



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VLASTNOSTÍ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ S PŘÍDAVKEM POLYMERNÍCH VLÁKEN

STUDY OF PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES WITH ADDITION OF POLYMER FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Dokoupil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tomáš Dokoupil
Název	Studium vlastností cementových kompozitů s přídavkem polymerních vláken
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Bodnárova L.: Kompozitní materiály (CJ02). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST
Hela R.: Technologie betonu I (BJ09). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST
Hela R.: Technologie betonu II (BJ15). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST
Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2015-2019)
České a zahraniční technické normy
Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Polymerní vlákna jsou přidávána do cementových kompozitů pro zlepšení jejich vlastností. Používají se zejména pro omezení vzniku smršťovacích trhlin a pro zvýšení odolnosti cementových kompozitů vůči působení vysokých teplot (pro omezení explozivního odprýskávání). Nejčastěji jsou do cementových matic používána vlákna polypropylenová.

Na základě rešerší odborné literatury uveďte informace o vlivu přídavku polymerních vláken na vlastnosti betonu. Zaměřte se nejenom na vlákna polypropylenová, ale uveďte informace i o dalších polymerních vláknech. Uveďte příklady konkrétních aplikací polymerních vláken v cementových kompozitech, uveďte vlastnosti těchto použitých vláken a vlastnosti výsledných kompozitů. Definujte postupy pro ověření efektu přídavku vybraných polymerních vláken na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých cementových kompozitů.

Navrhněte postup pro sledování rozmísení vláken v kompozitu.

Předpokládaný rozsah práce je cca 40 - 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá užitím polymerních vláken v cementové matrici. Popisuje rozdělení a výrobu nejběžněji používaných polymerních vláken a také požadavky na jejich vlastnosti. Je uvedeno porovnání vlastností různých typů polymerních vláken. Práce představuje jednotlivé složky matrice vláknobetonu, její výrobu, zkoušení čerstvého i ztvrdlého vláknobetonu a konkrétní příklady jeho využití v praxi. S využitím odborných rešerší je podrobně popsán vliv PP, PE a PVA vláken na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Jsou uvedeny také nové trendy využití polymerních vláken. V závěru práce je navržen postup experimentálního ověření vlastností vláknobetonu v porovnání s referenčním vzorkem prostého betonu.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the use of polymer fibers in cement matrix. It describes the distribution and production of the most commonly used polymer fibers as well as the requirements for their properties. A comparison of the properties of different types of polymer fibers is given. The work presents the individual components of the fiber concrete matrix, its production, testing of fresh and hardened fiber concrete and specific examples of its use in practice. Using professional research, the influence of PP, PE and PVA fibers on the properties of fresh and hardened concrete is described in detail. New trends in the use of polymer fibers are also presented. At the end of the work, a procedure of experimental verification of the properties of fiber-reinforced concrete in comparison with a reference sample of plain concrete is proposed.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymerní vlákna, vláknobeton, rozptýlená výztuž, polypropylenová vlákna, polyethylenová vlákna, polyvinyl alkoholová vlákna, explozivní oprýskání, samohojení, zkoušení vláknobetonu

KEYWORDS

Polymer fibers, fiber concrete, dispersed reinforcement, polypropylene fibers, polyethylene fibers, polyvinyl alcohol fibers, explosive peeling, self-healing, fiber concrete testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Tomáš Dokoupil *Studium vlastností cementových kompozitů s přídavkem polymerních vláken*. Brno, 2020. 87 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studium vlastností cementových kompozitů s přídavkem polymerních vláken* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

Tomáš Dokoupil
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium vlastností cementových kompozitů s přídavkem* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

Tomáš Dokoupil
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval paní doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, vstřícnost a věcné připomínky v průběhu psaní této práce.

OBSAH

ÚVOD	9
CÍL PRÁCE	9
1 POLYMERNÍ VLÁKNA	10
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH VLÁKEN	10
1.2 VÝROBA POLYMERNÍCH VLÁKEN	11
1.2.1 Zvlákňování tavné	12
1.2.2 Zvlákňování suché a mokré	13
1.2.3 Elektrostatické zvlákňování	14
1.3 POŽADAVKY NA VLASTNOSTI POLYMERNÍCH VLÁKEN	15
1.4 NEJVÝZNAMNĚJŠÍ POLYMERY PRO VÝROBU VLÁKEN	17
1.5 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH POLYMERNÍCH VLÁKEN	18
2 TEORIE VLÁKNOBETONU	20
2.1 HISTORIE	20
2.2 VLÁKNOBETON V SOUČASNOSTI	21
2.2.1 Složky čerstvého vláknobetonu	22
2.2.2 Výroba a technologie provádění vláknobetonu	23
2.3 ZKOUŠENÍ VLÁKNOBETONU	25
2.3.1 Zkoušení čerstvého vláknobetonu	25
2.3.2 Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu	28
2.4 PŘÍKLADY VYUŽITÍ VLÁKNOBETONU V PRAXI	38
3 VLIV POLYMERNÍCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ	42
3.1 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ VLÁKNOBETONU S VLASTNOSTMI KOMPOZITŮ BEZ VLÁKEN	42
3.1.1 Fyzikální vlastnosti	42
3.1.2 Vlastnosti spojené s odolností	45
3.1.3 Mechanické vlastnosti	47
3.2 NOVÉ TRENDY V APLIKACI POLYMERNÍCH VLÁKEN DO CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ	54
3.2.1 Odolnost vláknobetonu proti vysokým teplotám	54
3.2.2 Vliv vláken na samohojení cementových kompozitů (self-healing)	54
3.2.3 Využití kontinuálních vláken cementových kompozitech	57
3.2.4 Použití PP vláken pro zlepšení dynamického chování betonu	60
3.2.5 Použití PP vláken ve vysokohodnotném samozhutňujícím těžkém vláknobetonu (HPFRHW SCC)	63
4 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘOVÁNÍ VLIVU PŘÍDAVKY POLYMERNÍCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI ČERSTVÝCH A ZATVRDLÝCH BETONŮ	66
ZÁVĚR	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
SEZNAM TABULEK	85
SEZNAM GRAFŮ	85
SEZNAM OBRÁZKŮ	85
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	87

ÚVOD

Díky svým vlastnostem a universálností využití jsou polymerní vlákna stále předmětem velkého zájmu. Díky technologickému rozvoji dochází k výraznému pokroku ve vývoji využívání polymerních látek v široké škále odvětví. Nové postupy a technologie tak dávají vzniknout novým druhům vláken, které jsou výhodné jak ekonomicky, tak i svými vlastnostmi.

Mezi nejužívanější polymer pro výrobu vláken pro aplikace v oblasti stavebnictví se řadí polypropylen. Představuje velkou část trhu, ale své využití také nachází vlákna z polyesteru, polyamidu nebo polyvinyl alkoholu. Častým výrobkem jsou také polymerní kompozitní vlákna, která v sobě spojují několik polymerů a mohou nabídnout výrazně lepší vlastnosti. Jejich využití v cementové matrici sebou nese také několik záporných vlivů, se kterými je nutno počítat při návrhu matrice.

CÍL PRÁCE

Cílem této práce je představení polymerních vláken jako možné alternativy pro ocelová vlákna. Polymerní vlákna mohou betonu umožnit použití dokonce i tam, kde by přídavek ocelových vláken nebyl možný. Moderní makrovlákna mohou být také téměř rovnocennou náhradou ocelových vláken, co se týče jejich tahových a ohybových vlastností v cementové matrici.

V práci jsou s využitím odborných rešerší představeny jak možnosti využití moderních polymerních vláken v běžných konstrukčních betonech, tak také uvedeny nejnovější trendy v užití polymerních vláken.

V závěru práce uvádí shrnutí zkoušek a vlastností a návrh postupu experimentálního zkoušení vláknobetonu pro konstrukční užití.

1 POLYMERNÍ VLÁKNA

1.1 Základní rozdělení polymerních vláken

Skupina polymerních vláken je velmi široká. Co se materiálu vláken týče, zmiňuje Vacl ve své bakalářské práci polymerní nanovlákná a jejich kompozity, biodegradabilní polymerní vlákna či vysokopevnostní vlákna. Vysokopevnostní vlákna se dále dají rozdělit na uhlíková, aramidová, polyethylenová, polypropylenová či LCP (liquid crystal polymer) a v neposlední řadě také tzv Biosteel. [1]

Pro stavebnictví mají největší význam vlákna polypropylenová, polyethylenová, polyvinyl alkoholová a v posledních letech nachází čím dál větší uplatnění moderní uhlíková a nanovlákná.

Mezi základní charakteristiky vláken patří jejich délka. Ta se dá určit přímo jako délka jednotlivých vláken nebo jako štiřlostní poměr dle vzorce níže.

$$P = L / d$$

Kde p značí štiřlostní poměr, L poté délku vlákna a d jeho průměr.

Dle výsledného poměru se poté dělí na:

1. Krátká ($p = 10\text{--}50$)
2. Střední ($p = 50\text{--}500$)
3. Dlouhá ($p = 500\text{--}5000$)
4. Nekonečná ($p = 5000 +$). [1]

ČSN EN 14889-2 dále dělí vlákna dle fyzického tvaru. Rozděluje polymerová vlákna do tří tříd. [7]

Třída Ia: Mikrovlákná s průměrem $< 0,30$ mm, jednovláknovitá (tzv. monofilamentická)

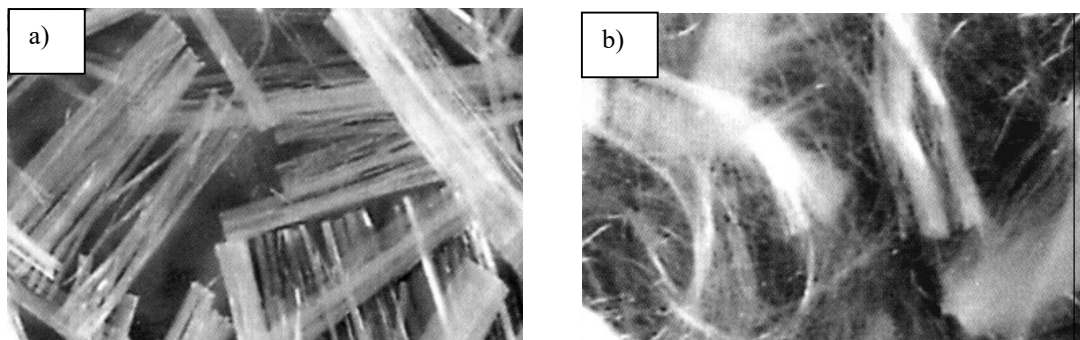
Třída Ib: Mikrovlákná s průměrem $< 0,30$ mm, vláknitá (tzv. fibrilovaná)

Třída II: Makrovlákná s průměrem $> 0,30$ mm

Tento tvar je ovlivněn způsobem výroby. Monofilamerní vlákna jsou jemnější a z toho plyne, že jich je v betonu větší množství při stejné hmotnosti. Tyto vlákna jsou vyráběna jednotlivě, viz kapitola 1.2 Výroba polymerních vláken. Z technologie výroby mají

kruhový průřez a jsou dělena na požadovanou délku z nekonečného vlákna. Rozvlákněná neboli fibrilovaná vlákna jsou vyráběna řezáním fólie a po vytvoření těchto vláken opět dělena na požadovanou délku. Takto vyráběná vlákna mají hranatý průřez a také drsnější povrch daný technologií výroby. [1]

Obr. 1: a) Fibrilovaná vlákna b) Monofilamentní



Zdroj: [2] Bodnárová, L., (2010). Kompozitní materiály

1.2 Výroba polymerních vláken

Polymerní vlákna najdeme v různých podobách téměř v každém odvětví. Velké zastoupení zabírají vlákna v textilním či automobilovém průmyslu. Existuje několik různých způsobů výroby. Technologie jednotlivých procesů se liší, jejich základní kroky jsou však shodné. [1]

Prvním krokem společným pro všechny technologie je příprava vláknotvorné látky. Slouží ke zvláknění a je tvořena roztokem polymeru či jeho taveninou. Zvláknění probíhá protlačení zmíněné látky tryskami do prostředí, kde dochází k pozvolnému tuhnutí či koagulaci. Produktem tohoto prvního kroku je tzv. nedloužené vlákno, které je křehké, nestabilní a má krátké neusměrněné řetězce polymeru. [1]

Dalším krokem je tzv. dloužení. Díky tomuto procesu získává vlákno své finální vlastnosti. Vlákno je vystaveno podélné deformaci tahem a jeho prodloužením o 20-2000 % původní délky. Toto prodloužení se udává dloužícím poměrem λ , který udává poměr mezi délkou prodlouženého a neprodlouženého vlákna. Poměr nabývá obvykle hodnot 3 až 5. Při dloužení dojde namáháním k usměrnění polymerních řetězců ve směru podélné osy vlákna. Dojde také k tvorbě celkové vlákenné struktury, zvýšení pevnosti a snížení tažnosti. Technologie výroby dělí dloužení na dloužení za tepla a za studena. [3] Vlákna jsou však stále nestabilní a je potřeba jejich vlastnosti uchovat. K tomu slouží další krok a to fixace.

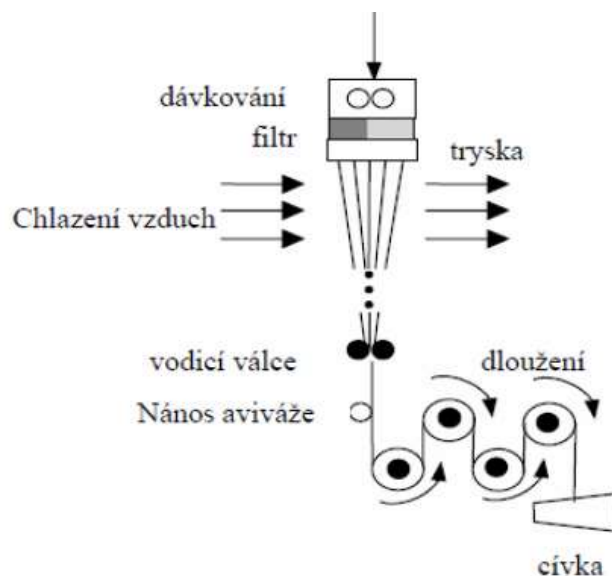
Jedná se o stabilizaci nejčastěji teplem. Podle způsobu fixace dochází k modifikaci buď pevnosti nebo tažnosti vlákna. Nejčastěji se pro fixaci používá vodní pára, horký vzduch či plastifikační činidla. [1]

Zvlákňování se v praxi provádí několika způsoby. Způsob zvlákňování je nejvýraznějším rozdílem mezi jednotlivými technologickými postupy. Používají se především čtyři způsoby a to tavné, suché, mokré a elektrostatické.

1.2.1 Zvlákňování tavné

Je vhodné u polymerů, které mají bod tavení nižší, než je teplota rozkladu polymeru. Připravená tavenina je vedena skrz otvory trysek o specifickém průměru. Vzniklý proud taveniny je ochlazován proudem vzduchu a poté postupuje k dalším krokům výroby znázorněný na obrázku č.3 [4]

Obr. 2: Schéma tavného zvlákňování



Zdroj: [1] Vacl, J., (2012). *Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti*

Pokud je vlákno taveniny ochlazováno pomaleji jsou výsledkem velmi jemná vlákna o jemnosti méně než 20 tex. ($1 \text{ tex} = 1 \text{ g hmotnosti na } 1 \text{ km vlákna}$). [12] Rychlost vytváření vlákna je podle technologie 400 až 10 000 metrů za minutu. Pokud je ale vlákno chlazeno intenzivně, vznikají hrubá vlákna o průměru 0,1 až 1 mm. [3]

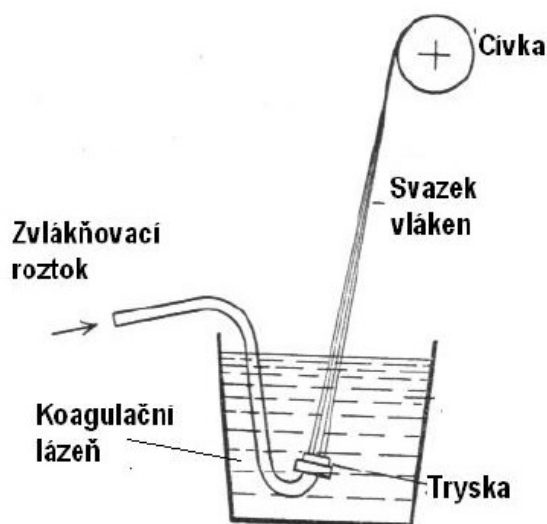
Tavným zvlákňováním se vyrábí polyestery, polyamidy a především polypropylen, kterým se v této práci zabýváme nejvíce. [3]

1.2.2 Zvlákňování suché a mokré

Polymery, u kterých by zahřátím na teplotu tavení došlo k jejich rozkladu musí být zvlákňováním vytvářeny z roztoku. Dle technologie dělíme tento způsob na mokrý a suchý. [4]

Mokrý způsob zvlákňování využívá roztoku polymeru o nižším procentu koncentrace (5-25 % polymeru). Polymer je rozpuštěn v netěkavém rozpouštědle, které je po opuštění trysky vymýváno v kapalině a polymer je vysrážen a navíjen na cívku pro další zpracování. Rychlost srážení vlákna závisí na difúzi daného polymeru a pohybuje se v rozmezí 5-200 metrů za minutu. Mokrý způsob zvlákňování je nejvíc využíváno pro výrobu vláken z polymerů vyskytujících se v přírodě. [1]

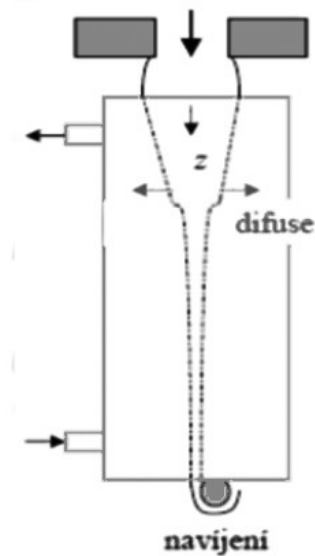
Obr. 3: Mokrý způsob zvlákňování



Zdroj: [5] Pakostová, V., (2017). Textilní vlákna

Při **zvlákňování za sucha** je rozpouštědlo těkavá látka. Ta se po průchodu chladicí komorou vypaří a zůstane polymerní vlákno, které se odvíjí na cívku. Aby tento způsob fungoval, musí být koncentrace polymeru v roztoku vyšší než u mokrého způsobu a to 15-32 % obsahu polymeru. Rychlost vzniku a tím pádem i odvíjení vlákna je také vyšší a při tomto způsobu vzniká vlákno rychlostí 100 až 1000 metrů za minutu. Tímto procesem se vyrábí například acetátová nebo polyvinylchloridová vlákna. [4] [5]

Obr. 4: Zvlákňování za sucha



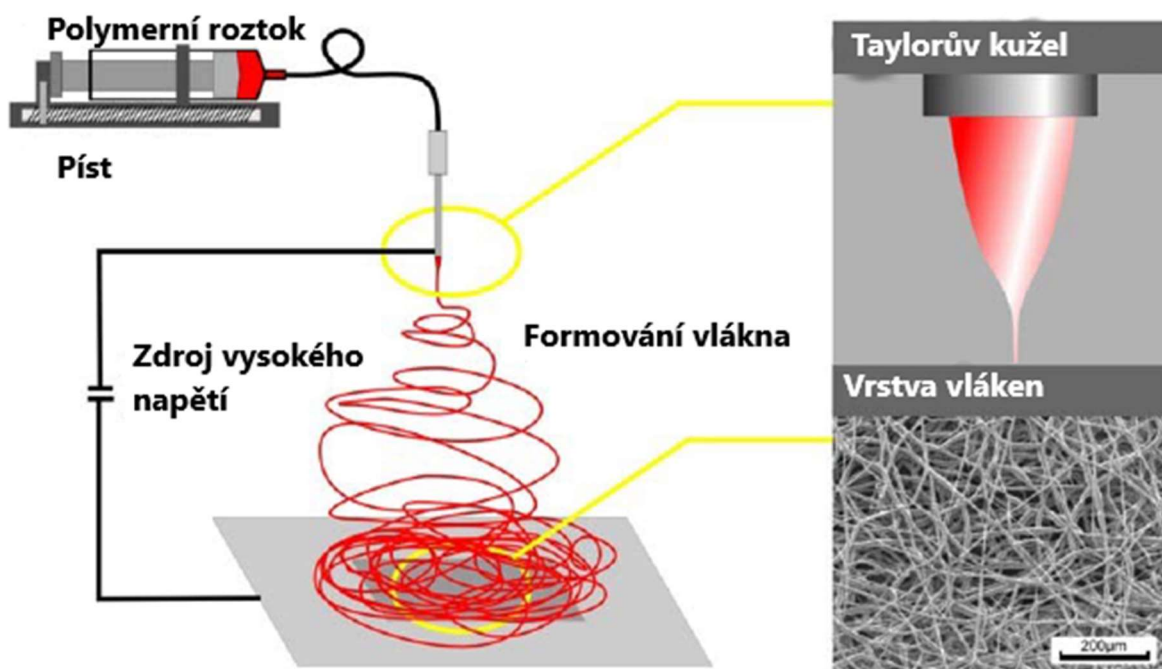
Zdroj: [3] TUL, Fakulta textilní, (2015). Textilní materiály, přednáška 4

1.2.3 Elektrostatické zvlákňování

Dnes nejběžnější metodou po výrobu nanovláken je elektrostatické zvlákňování. Pracuje na principu působení elektrostatického účinku na roztok polymeru nebo taveninu. Roztok putuje na trysku o daném průměru, na jejíž konec působí silné elektrické napětí. Toto napětí vypudí ze špičky kapiláry velmi tenký proud nabitého roztoku. Proud putuje směrem ke sběrači (kolektoru), po cestě se z něj odpaří rozpouštědlo a vznikne tenké vlákno. Pokud se místo roztoku používá tavenina, dojde místo k odpaření roztoku k ochlazení a zatuhnutí taveniny. [1]

O tenkém průměru svědčí i obrázek č. 6, kde je detail tzv. Taylorova kužele, který napětím vzniká na špičce kapiláry. Zde je zřejmé že vzniklé vlákno je několikanásobně užší, než je průměr samotné kapiláry. Jeho výsledný průměr ovlivňuje například velikost napětí, druh rozpouštědla, viskozita roztoku a další. [1]

Obr. 5: Elektrostatické zvlákňování



Zdroj: [6] Oxolutia, (2014). přeloženo

Za zmínku rozhodně stojí technologie elektrostatického zvlákňování označovaná **Nanospider**. Tuto technologii vyvinul a nechal si patentovat vědecký tým pod vedením prof. Jirsáka na Technické univerzitě v Liberci. Tato technologie je uvedena pod patentem č. 307884. [103] [1]

Podstata této metody spočívá ve schopnosti vytvořit Taylorovy kužely na volné hladině polymerního roztoku, a ne pouze na špičce kapiláry v trysce. Dochází tak v podstatě k tažení velkého množství vláken přímo z volné hladiny roztoku. Výhodou je vedle současné tvorby velkého množství vláken také snadnost ovládání a přesná kontrola průměru vlákna. [1]

1.3 Požadavky na vlastnosti polymerních vláken

ČSN EN 14889, Vlákná do betonu, je norma zabývající se v první části vlastnostmi kovových vláken a ve své druhé část pojednává o vláknech polymerních. Pro účely této práce budeme tudíž pracovat pouze s částí č. 2 - ČSN EN 14889-2 Vlákná do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda. V této kapitole budou zmíněny

základní vlastnosti a parametry, na které jsou kladeny požadavky uvedené ve zmíněné normě.

Vliv vláken na pevnost betonu – Vliv na pevnost betonu se určuje podle normy EN 14845-2 na referenčním betonu připraveném dle normy EN 14845-1. Pro ovlivnění pevnosti betonu musí výrobce deklarovat množství vláken na 1 m³ betonu potřebné pro dosažení zbytkové pevnosti v tahu ohybem viz. Kapitola 2.3.2 Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Výsledky této zkoušky určují zbytkovou pevnost na vzorku po dosažení daného rozevření trhliny. Normou stanovená hodnota je zbytková pevnost v tahu ohybem 1,5 MPa při šířce rozevření trhliny 0,5 mm nebo 1,0 MPa při rozevření 3,5 mm. Minimální počet trámů pro stanovení vlivu na pevnost betonu je 12, a toto zkoušení se provádí pouze pro vlákna třídy II. [7]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1, polymerní vlákna se dělí na třídy I (*mikrovlákna*) a II (*makrovlákna*). Tažné vlastnosti se pro jednotlivé třídy zkouší různými způsoby.

Síla vztažená k lineární hustotě vláken třídy I – U mikrovláken se síla vztahuje k lineární hustotě vláken, oproti vláknům o větším průměru, kde se síla vztahuje k ploše průřezu. Vlákna třídy I se zkouší dle EN ISO 2062. Zkouší se 30 jednotlivých vláken, zaznamenává se síla do porušení a všechny výsledky se zahrnou do výpočtu průměru a odchylky. Výsledná síla vztažená k lineární hustotě je určena jako podíl průměru síly potřebné k přetržení ku lineární hustotě. Stanovení lineární hustoty je popsáno v EN 13392 a každý druh vlákna ji musí mít výrobcem deklarovanou. [7]

Pevnost v tahu vláken třídy II – Pro makrovlákna se udává pevnost v tahu vypočítaná z poměru síly potřebné k přetržení ku ploše průřezu. Zkouší se opět 30 vláken a z výsledků je vypočítán průměr a směrodatná odchylka. Výrobce musí deklarovat pevnost v tahu vláken. Tolerance skutečné pevnosti je 15 % pro jednotlivé hodnoty a 7,5 % pro průměrnou pevnost ze všech zkoušení. [7]

Modul pružnosti – Jako všechny důležité vlastnosti musí být i modul pružnosti deklarován výrobcem. Zkouší se dle normy EN 10002-1 a vypočítává se ze zkoušení

30 vláken namáhaných 10 a 30 % pevnosti v tahu vláken. Z toho plyne, že modul pružnosti může být zkoušen pouze u vláken třídy II. [7]

Bod tavení a vznícení – Musí být deklarován, a je zkoušen dle ISO 11357-3. Je důležitou charakteristikou, pokud je požadavek na přidání vláken do betonu pro upravení jeho chování v případě požáru. Tato problematika bude dále popsána níže v kapitole 3.2.1 Odolnost vláknobetonu proti vysokým teplotám.[7]

Tvar a průměr vlákna – Každé vlákno má specifický tvar jak v příčném směru, tak v podélném směru, což může zahrnovat tvar průřezu, povrchovou úpravu či případné sdružování vláken. Průřez se často označuje tzv. ekvivalentním průměrem. Ten se rovná průměru kruhu, který má stejnou plochu jako daný příčný řez vláknem. Rozměry vlákna se také dají určit štihlостním poměrem, který je dán poměrem délky vlákna ku jeho ekvivalentnímu průměru. [7]

1.4 Nejvýznamnější polymery pro výrobu vláken

Do betonu přidáváme dle požadovaného účelu vlákna například čedičová, skleněná, kovová, a především vlákna polymerová. Využívá se několik druhů polymerů. V následující kapitole budou zmíněny nejběžněji používané druhy polymerů a důraz bude kladen na druhy polypropylenových vláken.

Polyethylen (PE) – Vlákná vzniklá tavným zvlákňováním, polymerací ethylenu. Jsou odolná proti alkáliím i kyselinám, mají dobré chemické vlastnosti, ale jsou snadno hořlavá. Kromě využití do betonu se mohou používat například jako pojivo pro netkané textilie. Obchodní názvy patří například Dyneema. [10]

Polyester (PES) – Vlákná vznikají opět tavným zvlákňováním, běžně mají průměr 0,2-0,4 mm. Polyesterová vlákna jsou odolná proti kyselinám, méně však proti zásadám. Použití vláken je přibližně do teplot 300 °C, poté nastává jejich degradace. Vyrábí je například česká firma Pirapi. [9] [13]

Polyamid (PA) – Polyamidová vlákna mají hladký povrch a průřez většinou kruhový. Jsou méně odolná vůči slunečnímu záření než polyesterová vlákna. K jejich rozkladu také

dochází při podstatně nižší teplotě a to kolem 150 °C. Nejsou také odolná proti kyselinám. Vlivem oxidace dochází ke ztrátě pevnosti. Vyrábí se dva základní druhy polyamidových vláken, a to silon a nylon. Mezi výrobce nylonových vláken do betonu patří například Bon (USA). [8] [13]

Polyvinyl Alkohol (PVA) – Na rozdíl od předchozích vláken se PVA vlákna vyrábí především mokřým zvlákňováním. Vyrábí se v jemnosti 0,2-0,3 tex jako jemný filament, nebo hrubější vlákna přes 2 mm v průřezu. Vysokopevnostní vlákna pro konstrukční účely se vyrábí gelovým zvlákňováním (obdoba mokrého zvlákňování). PVA vlákna se vyznačují vysokou pevností i modulem pružnosti, jsou odolné proti kyselinám i zásadám, obrusu a také slunečnímu záření. PVA vlákna do betonu jsou například vlákna MasterFibre 401 od firmy BASF. [11] [12] [14]

Polypropylen (PP) – Nejpoužívanější vlákna pro přidání do betonu jsou rozhodně polypropylenová vlákna. Vyrábí se tavným zvlákňováním a délka chladicí komory rozděluje PP vlákna na krátká a dlouhá. Délka komory pro dlouhá vlákna je v rozmezí 3 až 10 metrů, rychlost vytlačování je kolem 350 metrů vlákna za minutu. Kvalita dlouhých vláken je podstatně vyšší než u krátkých vláken. Krátká vlákna se vytváří nižší rychlostí v komoře dlouhé 1 m. Polypropylen je velmi odolný vůči chemikáliím i některým rozpouštědlům. Pokud polymerní systém neobsahuje kyslík, je odolný vůči teplotám až 350 °C. Pokud ale přidáváme PP vlákna pro omezení explozivního oprýskání betonu je požadavek na nižší teplotu tavení, proto je kladen důraz, aby se polypropylen tavil při teplotách kolem 160 °C. Vlákna mají nízkou hmotnost a pro své vlastnosti a nízkou cenu jsou jedny z nejčastěji používaných polymerních vláken ve stavebnictví. [13]

1.5 Porovnání vlastností vybraných polymerních vláken

Jak je zmíněno v předchozí kapitole, přidáváme do betonu velké množství různých druhů polymerních vláken. Vlákna mají některé rozdílné vlastnosti a některé jsou na druhou stranu obdobné pro všechny druhy polymerů. Nejlépe lze tyto rozdíly a podobnosti pozorovat v následující tabulce. Do tabulky 1 byly vybráni zástupci nejčastěji používaných polymerů. U polypropylenových vláken, jakožto nejpoužívanějšího zástupce, bylo porovnáno několik výrobků různých výrobců.

U polypropylenových vláken byli vybráni zástupci tak, aby zahrnovali co nejširší oblast využití PP vláken do betonu. Makrovlákna, jako například Forta Ferro, používáme pro zlepšení rázové odolnosti, houževnatosti, zlepšení únavové odolnosti a také pro omezení smršťování v plastickém i vytvrzeném stavu betonu. Pro částečné nebo úplné nahrazení svařovaných sítí nebo ocelových vláken se přidávají například vlákna BeneSteel. [22]

Mikrovlákna používáme jak fibrilovaná (Forta Econo NET), tak monofilamentní (Forta Econo MONO). Vlákná mají přibližně o řád menší průměr než makrovlákna a používají se primárně pro zamezení smršťovacích trhlin v ranných stádiích tvrdnutí betonu. Díky velkému množství vláken a husté rovnoměrné kostře z vláken také zlepšují odolnost a trvanlivost betonu. Mezi mikrovlákna řadíme také Fibrrex a Fibrin, u kterých výrobci uvádí zlepšení vlastností v chemickém prostředí, odolnosti proti obrusu, či například vytrhávání betonu při odbedňování. [22]

Tabulka 1: Porovnání vlastností vybraných polymerních vláken

Materiál	Výrobce	Označení	Modul pružnosti E	Pevnost v tahu R	Hustota ρ	Ekvivalentní průměr \varnothing	Délka	Protažení před porušením	Teplota tavení	Dávkování
			GPa	MPa	g/cm ³	mm				
PE		HDPE	0,8	1400-3090	0,86	1,5		3,5	125 ¹⁾	
PES	Pirapi	FIBRE PES	11,3	400-800	1,4 ¹⁾	0,81		8	253	/
PA	Bon	32-504 Nylon fibers	4 ¹⁾	966	1,2	20	19	20	255 ¹⁾	0,6
PVA	BASF	MasterFiber 401	30	790-1160	1,3	0,16-0,24	12	6-12	200 ¹⁾	15-45
PP	Botai	BTC-PP002	3,5	560	0,91	0,02-0,03	3-50	15-20	170	0,6-0,9
	Forta	Ferro	4,7	570-660	0,9	0,34	19/36/54	30 ¹⁾	160	1,7-4,4
		Econo – Net	4,7 ¹⁾	570-660	0,91	0,03 ¹⁾	19/38	/	160	0,9
		Econo – Mono	4,7 ¹⁾	570-661	0,91	0,03 ¹⁾	19	/	160	0,6
	Sklocem. Beneš	BeceSteel55	5,17	610	0,9 ¹⁾	0,48	55	/	150	1-4
	CHRYSO	Fibrin 1950 D	4,15	557	0,91	0,018	12	/	160	0,6-0,9

1) Obecná hodnota pro daný materiál (výrobce v technickém listu neuvedl)

/ Výrobce informaci neuvádí

Zdroj: [7], [9], [10], [11], [12], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]

2 TEORIE VLÁKNOBETONU

2.1 Historie

Koncept přidávání vláken do betonu je tu téměř od začátku stavebnictví samotného. Začal přidáváním slámy do hliněných cihel pro zlepšení vlastností, či později přidávání koňských žíní do jílu. Později našly velké užití azbestová vlákna, přidávaná nejčastěji do keramických výrobků. [23]

Cihly vyztužované slaměnými vlákny byly nalezeny například v Mezopotámii, kde nemusely vést přímo ke zlepšení pevnosti v tahu, ale již tenkrát byla vlákna využívána pro omezení vzniku smršťovacích trhlin, a po jejich vytvoření pro omezení rozevírání trhliny. Tyto nepálené cihly byly velmi náchylné k degradaci a porušení v důsledku opakovaného vlhčení a vysoušení, a proti těmto vlivům jsou vlákna úspěšně využívána dodnes. [23]

Vývoj používání vláken můžeme rozdělit do dvou poměrně jasně ohraničených časových úseků. První fáze začala přibližně roku 1874 prvním výzkumem zabývajícím se možností využití ocelových drátků do betonu. Naaman ji ve své publikaci označuje jako spící období. Bylo představováno velké množství patentů, ale nápady nebyly téměř realizovány. Pro nedostatek průkazných zkoušek vládla nedůvěra v přidávání krátkých vláken místo vyztuže se statickým účinkem. Na důvěryhodnosti nepřidával fakt, že většina patentů slibovala zlepšení mechanických vlastností betonu vlákny, ale zkoušky ukazovaly velmi malý účinek. Druhá fáze začíná počátkem sedmdesátých let 20. století. Její počátek je ohraničen vydáním vědecké studie Romualdiho v roce 1963. Ve své práci sice pořád stojí za názorem, že vlákna zlepší mechanické vlastnosti, tento fakt ale řeší okrajově. Největším přínosem jeho práce je přivedení pozornosti na možnost přidání vláken pro snížení vzniku trhlin v betonu. Toto byl startující bod, díky kterému se začalo provádět mnohem více zkoušek a praktických aplikací vláken. Díky této snaze byly vyvinuty kompozity s několikanásobně vyšším modulem pružnosti a pevností v tahu, než umožňovala původní vlákna první fáze. [23]

2.2 Vláknobeton v současnosti

Od roku 1963 došlo k výraznému rozvoji využití vláken i přes počáteční neúspěchy, a především nedůvěru, myšlenka na zlepšení největší slabiny betonu byla příliš lákavá na to, aby vývoj nepokračoval dál. Byly a stále jsou představovány nové druhy kompozitů, jenž zlepšují vlastnosti betonu v různých směrech.

Moderní vláknobeton rozdělujeme podle několika kritérií. Michniak ve své práci přehledně rozděljuje vláknobetony následovně:

Rozdělení dle druhu vláken:

- FRC (Fibre Reinforced Concrete) s ocelovými vlákny
- FRC se syntetickými vlákny
- FRC se skleněnými vlákny
- FRC s přírodními vlákny.

Rozdělení dle místa a způsobu výroby:

- Vyráběný přímo na staveništi
- Vyráběný v centrální výrobě vláknobetonu a převezený na místo stavby v čerstvém stavu
- Prvky vyráběné ve výrobně konstrukčních FRC prvků.

Rozdělení dle statické funkce:

- Nosný FRC
- Nenosný FRC.

Rozdělení dle přidáných výztuží:

- Beton vyztužený pouze vlákny
- Vláknobeton vyztužený betonářskou výztuží
- Vláknobetonu vyztužený předpínací výztuží.

[22]

2.2.1 Složky čerstvého vláknobetonu

Hela ve své publikaci definuje vláknobeton jako „Speciální typ konstrukčních betonů, jejichž struktura obsahuje, mimo obvyklých složek, vlákna“ [24]

Zlepšení vlastností betonu přidáním vláken je podmíněno jejich rovnoměrným rozmístěním v betonu. Pokud je tato podmínka splněna, pak vzniklý kompozit vykazuje výrazné zlepšení některých jeho vlastností, a to především těch vlastností, jež jsou často považovány za jeho největší slabiny. [24]

Pro správné rozptýlení vláken v betonu a dosažení požadovaných účinků vláken v betonu je potřeba správně navrhnout a připravit betonovou směs. Následující kapitola se zabývá složkami tvořícími výslednou betonovou směs.

Cement

Pro vláknobeton můžeme využít stejný cement jako bychom použili pro prostý beton v daných podmínkách. Přídavek vláken neovlivní výběr cementu, který závisí především na požadavku pevnosti v tlaku, stupni agresivity prostředí, rychlosti nárůstu pevnosti či množství hydratačního tepla. Stejně jako u ostatních složek betonu i u cementu může být rozhodujícím faktorem jeho cena. [24]

Voda

Stejně jako u cementu, vodu pro záměs můžeme použít stejnou jako pro běžný beton bez vláken. Požadavky na vodu jsou stejné a řídí se normou ČSN EN 1008. [24]

Kamenivo

Jako předchozí složky ani kamenivo není příliš ovlivněno přidáním vláken. Při přidání vláken s vysokou tuhostí (ocelová) by bylo potřeba upravit křivku zrnitosti pro dokonalé spolupůsobení s cementovou matricí. Při přidávání ohebných polymerních vláken se tudíž požadavky téměř nemění. Jedinou podmínkou je poměr maximálního zrna kameniva k délce vlákna. Délka vlákna by měla být maximálně 3krát větší, než je maximální zrno kameniva. Speciální případ je výroba kompozitů zvaných SIFCON (Slurry Infiltrated Fibre Concrete). Zde jsou vyloučené hrubé podíly a jedná se tedy v podstatě o kostru z vláken vyplněnou jemnozrnnou cementovou maltou. Tímto druhem kompozitu se ale v práci

nezabýváme, proto můžeme prohlásit, že požadavky kameniva do vláknobetonu se téměř nemění v porovnání s běžným betonem. [24]

Přísady

Přídavek vláken výrazně zhoršuje zpracovatelnost a pohyblivost čerstvé betonové směsi. Proto je téměř nutností přídavek plastifikačních či superplastifikačních přísad zlepšujících tyto vlastnosti. Někteří výrobci v technických listech vláken dokonce pro lepší přípravu a možnost navržení směsi uvádí, o kolik se zhorší zpracovatelnost přídavkem vláken. Například přídavek deklarovaného množství vláken BeneSteel 55 zhorší stupeň zhutnění dle EN 14845-1 z C2 (1,22) na C1 (1,33). [19]

Ostatní přísady přidáváme ze stejných důvodů jako u běžného betonu, pokud je na použití těchto přísad kladen požadavek. Při přidávání provzdušňující přísady je ale nutno myslet na skutečnost, že mícháním se na povrchu vláken vytváří vzduchové bublinky. Přídavek vláken do betonu tak zvyšuje obsah vzduchu v čerstvém betonu až o 2 %. Velikost takto vzniklých pórů je ale bohužel větší, než je účinná velikost pórů zlepšujících mrazuvzdornost. Tyto póry tedy vedou pouze k možnému snížení pevnosti v tlaku. [24]

Příměsi

Užití příměsí je u vláknobetonů o něco častější než u běžných betonů. S výhodou používáme přídavek jemných podílů k navýšení množství jemnozrnného tmelu pro dokonalé obalení povrchu přidaných vláken. Chemicky aktivní přísady používáme ve stejné míře u vláknobetonů jako i u prostého betonu. Tedy pouze pokud je na tento přídavek požadavek. Přidávání příměsí se řídí stejnými zásadami jako u prostého betonu. Přidání velkého množství příměsí je používáno pouze u kompozitů typu SIFCON, které byly zmíněny dříve. [24]

2.2.2 Výroba a technologie provádění vláknobetonu

Polymerní vlákna ve stanovené dávce přidáváme do míchačky po kamenivu s cementem., poté při míchání přidáváme vodu a s poslední částí vody zvolené přísady, ve většině případů plastifikátor. Polymerní vlákna do betonu jsou lubrikována, takže se po styku s vodou dokonale rozmísí v záměsi.

Jak již bylo zmíněno, přidání vláken zvýší obsah vzduchových pórů v betonu a zhorší zpracovatelnost, vláknobetony se tedy v naprosté většině případů hutní. Výjimku tvoří FRSCC (Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete). Zde je ale speciálně upravena receptura.

Vláknobeton můžeme přepravovat a čerpat stejně jako prostý beton. I ošetřování je obdobné, u vláknobetonu se správným ošetřováním můžeme pozorovat výrazně lepší a hutnější povrch bez porušení smršťovacími trhlinami. Vlákná v betonu také zabraňují vytrhávání betonu při odbedňování.

Z důvodů nutnosti dokonalého rozmísení vláken a náročnosti hutnění čerstvé směsi se vláknobeton s výhodou využívá v prefabrikovaných výrobcích. Průmyslové míchačky jsou schopny zajistit dokonalé promísení směsi, ověřit homogenní rozmísení vláken a po načerpání do formy je výrobek zhutněn vnější vibrací. Při betonáži na stavbě je nejčastější způsob vibrace ponornými vibrátory, což ale může způsobit problémy kvůli vláknům. Tato problematika je dále více rozebrána.

2.3 Zkoušení vláknobetonu

Pro zajištění splnění všech požadovaných vlastností je nutno na vláknobetonu provést sadu zkoušek. Ty slouží jak pro zajištění stálosti vlastností vláknobetonu z betonáren, tak jako ujištění zákazníka o kvalitě betonu a shodě s požadovanými vlastnostmi. Zkoušky provádíme také pro ověření nových receptur betonu a v případě nesplnění podmínek nám právě výsledky těchto zkoušek mohou napovědět, jak zkoumanou recepturu upravit.

2.3.1 Zkoušení čerstvého vláknobetonu

Přidání vláken do betonu výrazně ovlivní zpracovatelnost a tím pádem téměř všechny zkoušky prováděné na čerstvém vláknobetonu. Běžně se provádí zkouška sednutí kužele a zkouška VeBe. Vlákná přidaná do betonu jsou náhodně rozmístěna a mají neusměrněný charakter. Při těchto zkouškách jsou při hutnění propichováním tyčí vlákna deformována a je násilně měněna struktura vláknobetonu, proto se jako vhodná varianta uvádí zkouška rozlitím čerstvého vláknobetonu. [77]

Zkouška rozlitím

Zkouška je jak pro vláknobeton, tak pro prostý beton prováděna dle ČSN EN 12350–5.

Na rozdíl od zkoušky sednutím kužele a VeBe, průběh zkoušky rozlitím nenarušuje strukturu vláknobetonu. Konzistence čerstvého betonu se určuje podle průměru rozlití zkoušeného betonu na desce rozměrů 700 x 700 mm.

Strásací stůl tvořený pevnou podkladní deskou a horní deskou upevněnou na pantech je umístěn na rovnou podložku. Na něj je do středu umístěn kužel s dolní podstavou průměru 200 mm, horní podstavou průměru 130 mm a výškou 200 mm. Jak deska, tak kužel jsou před použitím navlhčeny. Zkoušený vláknobeton je plněn lopatkou ve dvou vrstvách, každá z nich je hutněna dusáním dusadlem čtvercového průřezu o hraně délky 40 mm. Každá vrstva je hutněna 10 lehkými údery. Po zarovnání horní vrstvy se kužel zdvihne. Horní deska se plynule zvedne do výšky 40 mm a spustí se volným pádem. Tento krok je proveden 15krát a poté je změřeno největší rozlití ve dvou kolmých směrech. [78]

Průměr změřeného rozlití je dle tabulky č. 2 zařazen do jedné ze 7 tříd.

Tabulka 2: Třídy rozlití kužele

Třída	Rozlití [mm]
F1	≥ 340
F2	350–410
F3	420–480
F4	490–550
F5	560–620
F6	630–750
F7	760–850

Zdroj: [78] ČSN EN 12350–5, (2009). Zkouška čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím

Stupeň zhutnitelnosti

Zkouška je prováděna dle normy ČSN EN 12350-4 doplněné o ustanovení týkající se vláknobetonu uvedené v ČSN P 73 2451.

Zkouška se provádí postupným plněním nádoby s podstavou tvaru čtverce o hraně délky 200 mm. Výška zkušební nádoby je 400 mm. Nádoba se zednickou lžící naplní bez zhutňování a lištou je seříznutý beton přesahující přes horní hranu. Beton se hutní na vibračním stole, dokud není zřejmé, že se objem již nemění. Poté se uprostřed každé strany změří hodnota o kolik klesla hladina betonu. Ze čtyř hodnot se vypočítá průměrná hodnota s , které se zaokrouhlí na celé milimetry. Hodnota se poté dosadí do vzorce níže a vypočítá se stupeň zhutnitelnosti c . [79]

$$c = \frac{h_1}{h_1 - s}$$

Kde: h_1 ... Vnitřní výška nádoby [mm]

s ... Průměrná hodnota poklesu hladiny betonu [mm]

Výsledný koeficient se zaokrouhlí na dvě desetinná místa a dle tabulky č. 3 se určí stupeň zhutnitelnosti betonu. [79]

Tabulka 3: Klasifikace dle zhutnitelnosti betonu

Stupeň	Slovní hodnocení	Stupeň zhutnitelnosti [-]
C0	Velmi tuhá	$\geq 1,46$
C1	Tuhá	1,45-1,26
C2	Plastická	1,25-1,11
C3	Měkká	1,10-1,04

Zdroj: [79] ČSN EN 12350–4, (2020). Zkouška čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti.

Přídavkem vláken očekáváme zhoršení zpracovatelnosti a zhutnitelnosti. Výrobci jsou dle normy ČSN EN 14889-2 povinni udávat, o kolik se zhorší zhutnitelnost přidáním deklarované dávky vláken. Díky této informaci můžeme posoudit, zda byla dodržena předepsaná dávka vláken do zkoušeného betonu. [80]

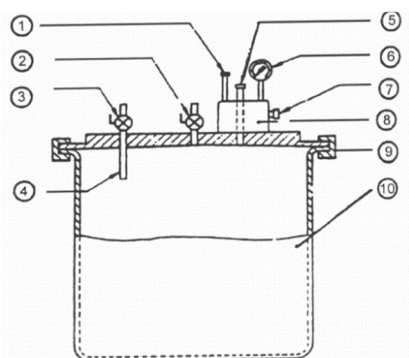
Obsah vzduchu

Zkouška je prováděna dle normy ČSN EN 12350-7 doplněné o ustanovení týkající se vláknobetonu uvedené v ČSN P 73 2451.

Zkušební nádoba o objemu minimálně 5 l se postupně plní v jedné nebo ve dvou vrstvách. Norma ČSN EN 12350-7 říká, že plnění by mělo být i s přesahem a po zhutnění pravítkem zarovnan povrch. Norma ČSN P 73 2451, upravující zkoušení pro čerstvý vláknobeton ale radí, aby bylo plnění prováděno spolu se souběžným hutněním pro přesné naplnění nádoby. Pokud by byl povrch vláknobetonu upravován pravítkem, může dojít k porušení homogenity povrchu, vykukování konců vláken či jejich vytržení. Dále oproti normě pro zkoušení prostého betonu upravuje způsob hutnění pouze na vibrační stůl nebo vibrátor s průměrem hlavice max 30 mm. Hutnění propichovací nebo zhutňovací tyčí je normou zakázáno. [80] [81]

Po naplnění je nádoba uzavřena a další postup je shodný s postupem pro prostý beton dle ČSN EN 12350-7. Uzavře se hlavní ventil a ventilem A se prostor pod víkem naplní vodou, dokud se z prostoru kompletně nevytlačí vzduch nad povrchem betonu. Poklepe se na nádobu pro odstranění bublinek a ventil se uzavře. Vzduchová komora se natlakuje a tlakoměr se nastaví do výchozí, nulové hodnoty. Poté se hlavní ventil otevře a po dosažení rovnoměrného tlaku se odečte hodnota na tlakoměru. Hodnota určuje obsah vzduchu v čerstvém betonu a odečítáme ji s přesností na 0,1 %. [81]

Obr. 6: Tlaková nádoba pro zjištění obsahu vzduchu



- 1 – hustilka
- 2 – ventil B
- 3 – ventil A
- 4 – prodlužovací hadička trubice kalibrační
- 5 – hlavní vzduchový ventil
- 6 – tlakoměr
- 7 – odvzdušňovací ventil
- 8 – vzduchová komora
- 9 – svorky
- 10 – nádoba

Zdroj: [81] ČSN EN 12350-7, (2009). Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody.

Objemová hmotnost

Zkouška je prováděna dle normy ČSN EN 12350-6 doplněné o ustanovení týkající se vláknobetonu uvedené v ČSN P 73 2451.

Zkouškou se zjišťuje objemová hmotnost zhutněného čerstvého betonu. Přidáním polymerních vláken neočekáváme výraznou změnu objemové hmotnosti, pro provádění zkoušky však platí podobná ustanovení jako u zkoušky obsahu vzduchu. Nádobu o známé hmotnosti a objemu plníme čerstvým betonem. Je doporučeno průběžné hutnění a plnění nádoby bez přebytku ze stejných důvodů jako jsou uvedeny u zkoušky obsahu vzduchu. Po zhutnění se plná nádoba zváží a hmotnost plné i prázdné se dosadí do vzorce níže. Výsledná objemová hmotnost se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 [80] [82]

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} [\text{kg/m}^3]$$

Kde: D ... objemová hmotnost čerstvého zhutněného betonu [kg/m^3]
 m_1 ... hmotnost prázdné nádoby [kg]
 m_2 ... hmotnost plné nádoby [kg]
 V ... objem nádoby

2.3.2 Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu

Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu provádíme na vzorcích normových rozměrů vyrobených dle normy ČSN EN 12390-1 shodně jako pro prostý beton. Zkoušky dělíme na destruktivní a nedestruktivní. Právě nedestruktivní zkoušky slouží k odhadu stejnorodosti, pevnosti či jiných vlastností betonu bez toho, aniž by se musely konstrukce porušit odběrem vzorků. Destruktivní zkoušky provádíme na vzorcích připravených v laboratorních podmínkách a ošetřovaných dle příslušné normy nebo na vzorcích odebraných z posuzované konstrukce.

a) Nedestruktivní zkoušení

Ultrazvuková impulzová metoda

Tato metoda se využívá pro ověření jakosti, homogenity a odhad některých fyzikálních vlastností ztvrdlého betonu. Princip metody spočívá v měření UZ vln vysílaných do vzorku betonu. Pozorovanou veličinou je rychlost průchodu UZ vln betonem. U betonu můžeme prohlásit, že čím rychleji se vlny v betonu pohybují, tím kvalitnější beton bude. Tento fakt může využít pro odhad informativní pevnosti v tlaku. Postup výpočtu je zmíněn níže. Měření rychlosti UZ vln v různých místech zkušebního prvku můžeme také využít pro určení homogenity betonu. Ve správně připraveném, homogenním betonu bude rychlost v různých výškových úrovních přibližně stejná. [83]

Měření probíhá přitlačením dvou sond na povrch zkušebního vzorku, tak aby byly sondy proti sobě. Poté se měří čas průchodu UZ vln od vysílací sondy do přijímací. Tento čas se musí vždy opravit o tzv mrtvý čas zjištěný na etalonu před měřením. [83]

Obr. 7: Místa měření UZ impulzové metody na kostce hrany 150 mm



Zdroj: [83] Cikrle, P., Anton, O., Daněk, P., Kucharczyková, B., Misák, P., (2010). NDT zkoušení ve stavebnictví: Příručka ČŽV

Pokud je měření prováděno dle ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu můžeme po dosazení do vzorce níže určit informační pevnost betonu v tlaku. Hodnoty do vzorce zadáváme v km/s a výsledek je pevnost v MPa. [84]

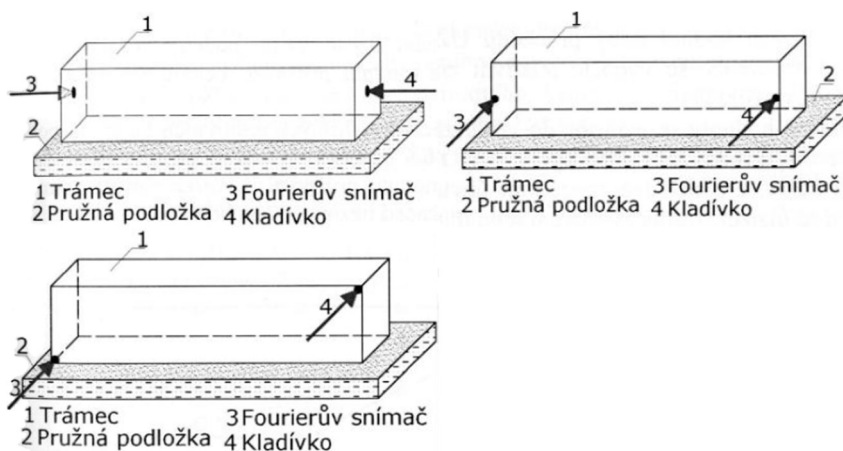
$$R_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8 \text{ [MPa]} \quad \text{Kde: } R_{be} \dots \text{ Informativní pevnost betonu v tlaku [MPa]}$$

$v_{L3} \dots$ rychlost šíření UZ vln v trojrozměrném prostředí [km/s]

Rezonanční metoda

Jako rezonance je označován jev, kdy se vyvodí takové vlnění, při kterém je kmitočet vnější síly shodný s kmitočtem tělesa. Zkouška se provádí vyvozením mechanického impulzu a pomocí snímače zaznamenáním kmitočtu tělesa. Zkušební těleso je umístěno na porézní izolační podložku, je osazeno sondami a impulzním kladívkem je vnesen daný mechanický impulz. Podle umístění snímačů je možné měřit kmitání podélné, příčné a kroutivé. [83]

Obr. 8: Umístění snímačů pro měření podélného, příčného a kroutivého kmitání



Zdroj: [83] Cikrle, P., Anton, O., Daněk, P., Kucharczyková, B., Misák, P., (2010). NDT zkoušení ve stavebnictví: Příručka ČŽV

Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul zjišťujeme jak ultrazvukovou, tak rezonanční metodou. Rozlišujeme dynamický modul pružnosti pevnosti v tlaku, tahu a ve smyku.

Pomocí ultrazvukové metody zjišťujeme dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku dle vzorce níže. Princip měření rychlosti šíření UZ vln je popsán v části *Nedestruktivní zkoušení ztvrdlého betonu*. [22]

$$E_{bu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6}$$

Kde: E_{bu} ... dynamický modul pružnosti [MPa]
 ρ ... objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m³]
 v_L ... rychlost šíření UZ [m/s]
 k ... koeficient rozměrnosti [-]

[83]

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu můžeme určit také pomocí výsledků měření rezonanční metody. Zde se vzorec pro výpočet mění podle měření příčného nebo podélného vlnění. [22]

Dynamický modul pružnosti z podélného vlnění *Kde: $f_L, f_f \dots$ fr. vlnění podélného, příčného [kHz]*

$$E_{fcrL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$$

*L ... délka zkušební tělesa [m]
 ρ ... objemová hmotnost [kg/m³]*

Dynamický modul pružnosti z příčného vlnění *c_1 ... korekční součinitel*

$$E_{fcrf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$$

i ... poloměr setrvačnosti [m]

[83]

Z výsledků zkoušek rezonanční metodou můžeme také získat dynamický modul pružnosti betonu ve smyku. Pro tento výpočet využíváme kroutivého vlnění. [22]

$$G_{fcr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho$$

*Kde: k ... součinitel závislý na tvaru tělesa
L ... délka zkušební tělesa [m]
 f_t ... frekvence kroutivého kmitání [kHz]
 ρ ... objemová hmotnost vzorku [kg/m³]*

[83]

b) Destruktivní zkoušení

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se stanovuje jak pro vláknobetonu, tak pro prostý betonu dle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkouška je prováděna na krychlich o hraně délky 150 mm nebo na válcích průměru 150 mm a výšce 300 mm. Vzorky jsou zatěžovány až do porušení rychlostí 0,5 MPa/s. [85]

Po porušení se zaznamená potřebná síla a dosadí se do následujícího vzorce.

$$f_{fc} = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]}$$

*Kde: f_{fc} ... pevnost vláknobetonu v tlaku [MPa]
F ... maximální zatížení při porušení [N]
 A_c ... průřezová plocha tělesa [mm²] [85]*

Dle výsledku je poté vzorek zařazen do pevností třídy vláknobetonu, které jsou uvedeny v Tabulce 1 normy ČSN P 73 2450. Podle druhu vzorku se pevnost označuje f_{fc} , c_k pro válcovou pevnost a f_{fc} , c_k , c_{cube} pro krychelnou pevnost. [77]

Tabulka 4: Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanové normou ČSN P 73 2450

Pevnostní třída v tlaku ¹⁾	Charakteristická válnová pevnost $f_{fc,ck}$ [MPa]	Charakteristická krychelná pevnost $f_{fc,ck, cube}$ [MPa]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115
¹⁾ $f_{fc,ck}$ nebo $f_{fc, ck, cube}$ stanovené průkazní zkouškou nesmí být menší než uvedená tabulková hodnota pevnostní třídy vláknobetonu		

[77] ČSN P 73 2450, (2015). Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

Statický modul pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku vyjadřuje deformační vlastnosti prvku zatíženého tlakem. Měří se deformace vzniklé vlivem zatížení, které je na základě Hookova zákona známé. Zkoušený prvek je osazen zařízením měřící deformace viz obrázek č. 10 a umístěn do zatěžovacího zařízení. Před začátkem samotného měření se soustava zatíží počátečním napětím 0,5 MPa a hodnota na všech zařízeních se zaznamená. Poté je napětí plynule zvětšováno, až do hodnoty jedné třetiny dříve zjištěné pevnosti v tlaku vláknobetonu. Po dosažení této pevnosti se po ustálení přístrojů (60 s) opět odečtou všechny hodnoty. Poté je pro kontrolu stejnorodosti betonu zkoušený prvek dál plynule zatěžován až do porušení. Je vypočítána pevnost v tlaku, která se nesmí lišit o více jak 20 % od původní pevnosti v tlaku. Pokud je tato podmínka splněna dosadíme hodnoty do vzorce níže a vypočítáme modul pružnosti vláknobetonu v tlaku E_{fc} . [86]

$$E_{fc} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_b}$$

Kde: σ_a ... horní zatěžovací napětí [MPa]
 σ_b ... základní zatěžovací napětí [MPa]
 $\Delta\varepsilon_a$... průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí
 $\Delta\varepsilon_b$... průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí

Obr. 9: Umístění zkušebního tělesa a měřících zařízení



Zdroj: [22] Michniak, R., (2013). Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony.

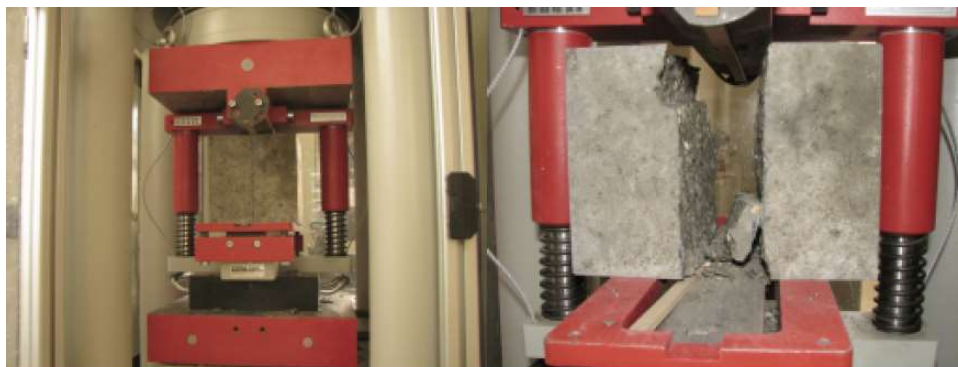
Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu se pro vláknobeton zkouší stejně jako pro běžný beton dle normy ČSN EN 12390–6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu. Zkouška se provádí na krychli o hraně délky 150 mm. Těleso se umístí do zatěžovacího zařízení, tak aby bylo podepřeno uprostřed stran v liniích proti sobě viz obrázek č. 11. Poté je plynule zatěžováno rychlostí 0,5 MPa za sekundu až do porušení. Výsledná síla se zaznamená a dosazením do vzorce se vypočítá pevnost vláknobetonu v příčném tahu. [87]

$$f_{fct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Kde: f_{fct} ... pevnost v příčném tlaku vláknobetonu [MPa]
 F ... maximální zatížení při porušení [N]
 L ... délka dotykové přímky tělesa [mm]
 d ... zvolený příčný rozměr tělesa [mm]

Obr. 10: zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli o délce hrany 150 mm

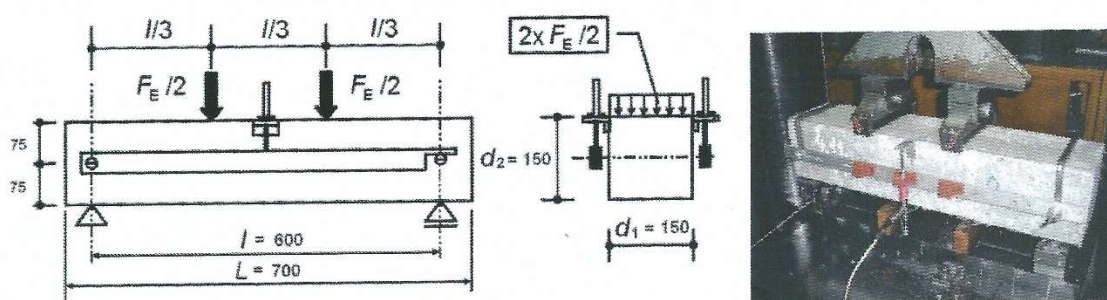


Zdroj: [22] Michniak, R., (2013). Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony.

Pevnost v tahu ohybem

Zkouška probíhá obdobně jako zkoušení prostého betonu v tahu ohybem dle normy ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Je ale upravena změnami uvedenými v normě ČSN P 73 2452. Rozdílný je především rozměr zkušebního trámce. Pro stanovení pevnostních tříd prostého vláknobetonu se užívá stanovení při namáhání dvěma břemeny. Pro zkoušku tedy využíváme čtyřbodový ohyb. Zkušební vzorek tvaru trámce o rozměrech 150x150x700 mm je opatřen tenzometrem a osazen do zkušebního zařízení jako je znázorněno na obrázku č. 12.

Obr. 11: Zařízení pro zkoušky pevnosti za ohybu dle ČSN P 2452

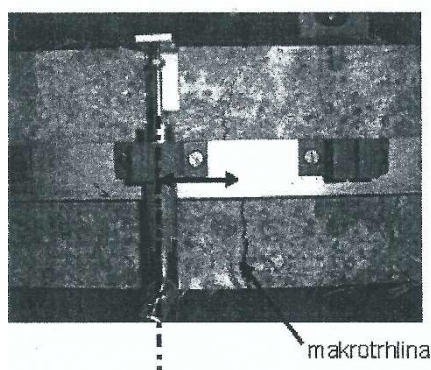


Zdroj: [89] ČSN P 73 2452, (2015). Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu.

Trámec je poté plynule zatěžován tak, aby byl nárůst průhybu 0,15 až 0,25 mm/min. Během zatěžování se průběžně zaznamenává průhyb s přesností na setinu milimetru. Zatěžování se zastaví, po dosažení průhybu 4,0 mm. Během zatěžování se v trávci vytvoří makrotrhlina, která se bude nacházet ve druhé třetině rozpětí trávce, mezi zatěžovacími válečky. Jak je na obrázku č. 13 vidět, změří se vzdálenost makrotrhliny od osy vzorku.

[89]

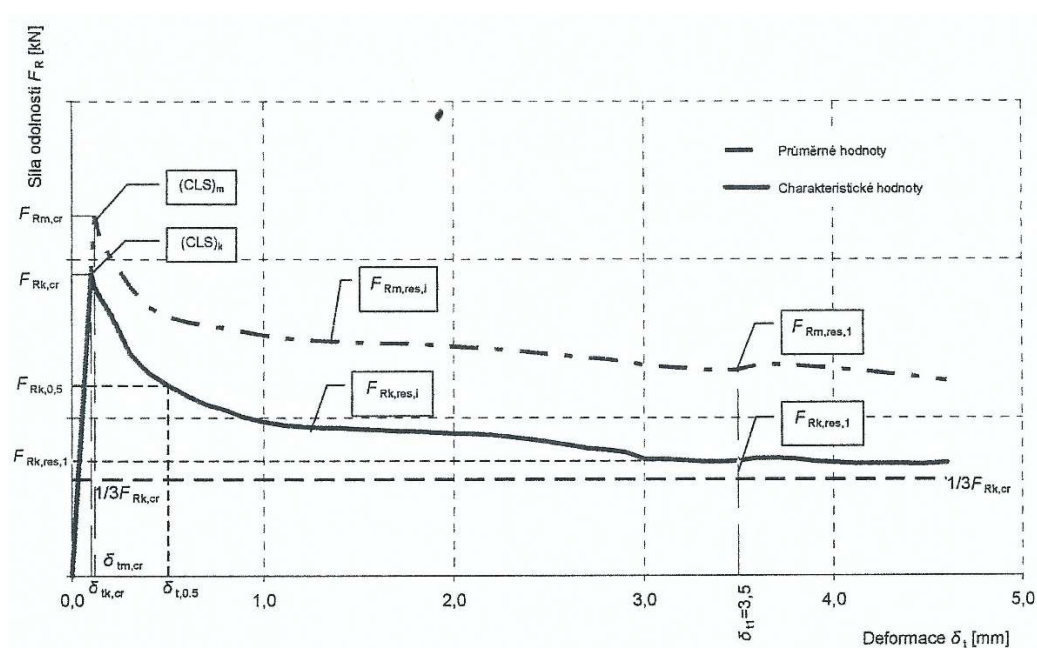
Obr. 12: Ukázka průběhu a měření vzdálenosti makrotrhliny od osy vzorku



Zdroj: [89] ČSN P 73 2452, (2015). Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu.

Graf č. 1 je příklad průběhu zkoušky normalizovaných zkušebních trámců se znázorněním průměrných (index m) a charakteristických (index k) hodnot. Z diagramu se vyčte síla odolnosti působící při vzniku makrotrhliny ($F_{Rk/m,cr}$), při průhybu 0,5 mm ($F_{Rk/m, 0,5}$) a při průhybu 3,5 mm ($F_{Rk/m, res, 1}$). [89]

Graf 1: Příklad průběhu zatěžování zkušebních trámců dle ČSN P 73 2452



Zdroj: [89] ČSN P 73 2452, (2015). Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu.

Aby mohl být zkoušený vláknobeton prohlášen za vhodný pro konstrukční použití, musí v každém budě diagramu splňovat podmínku zbytkové síly, která musí být větší než síla při vzniku makrotrhliny. Pokud tato podmínka není splněna, můžeme říct, že ztužení makrotrhliny vlákny není dostatečné. Vlákna v betonu můžeme v tomto případě zanedbat

a beton klasifikovat jako prostý. Pokud je podmínka splněna, tak můžeme naměřenou sílu vložit do vzorců níže a vypočítat odpovídající pevnosti. [89]

Pevnost v betonu v tahu za ohybu při vzniku makrotrhliny

$$f_{fc,tk,fl} = \frac{F_{Rk,cr} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Reziduální pevnost v dostředném tahu

$$f_{fc,tk,0.5} = 0,45 \cdot \frac{F_{Rk,0.5} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

$$f_{fc,tk,res,1} = 0,36 \cdot \frac{F_{Rk,res,1} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Kde: $f_{fc,tk,fl}$... charakteristická pevnost zkušebního trámce za ohybu [MPa]

$F_{Rk,cr}$... charakteristická odolnost normalizovaného trámce při vzniku makrotrhliny [N]

$f_{fc,tk,0.5}$... charakteristická reziduální pevnost vláknobetonu v dostředném tahu [MPa]

$F_{Rk,0.5}$... charakteristická odolnost normalizovaného trámce při průhybu $\delta_{t,0.5} = 0,5$ mm [N]

$f_{fc,tk,res,1}$... charakteristická reziduální pevnost vláknobetonu v dostředném tahu [MPa]

$F_{Rk,res,1}$... charakteristická odolnost normalizovaného trámce při průhybu $\delta_{t,0.5} = 3,5$ mm [N]

l ... rozpětí normalizovaného trámce [mm]

d_1, d_2 ... rozměry příčného řezu [mm]

[89]

Tabulka 5: Pevnostní třídy vláknobetonu v dostředném tahu stanovené normou ČSN P 73 2450

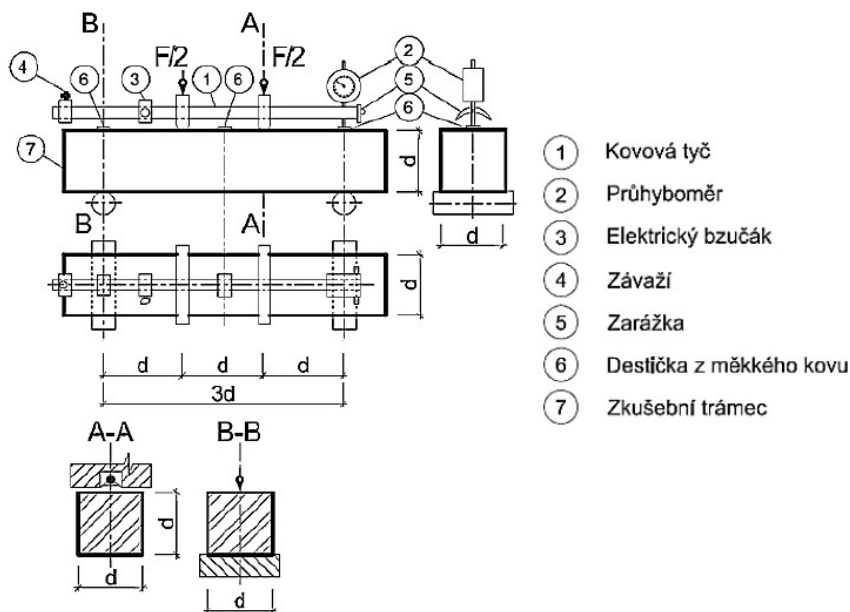
Pevnostní třídy vláknobetonu v dostředném tahu při průhybu 0,5 mm $f_{fc,tk,0.5}$ a při mezním průhybu $\delta_{t1} = 3,5$ mm $f_{fc,tk,res,1}$ [MPa] ^{1), 2)}
0,4
0,6
0,8
1,2
1,6
2
2,4
2,8
¹⁾ $f_{fc,tk,0.5}$ stanovené průkazní zkouškou nesmí být menší než uvedená tabulková hodnota zvolené pevnostní třídy vláknobetonu.
²⁾ Pokud jsou požadovány jiné reziduální pevnostní třídy vláknobetonu v dostředném tahu, než uvedené v tabulce musí se specifikovat jako dodatečné vlastnosti

[77] ČSN P 73 2450, (2015). Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

Statický modul pružnosti v tahu

Zkoušení trámů probíhá dle normy ČSN 73 6174 – Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem. Princip spočívá v měření průhybů zkoušených prvků při zatěžování čtyřbodovým ohybem. Zkušební sestava a osazení průhyboměru je znázorněno na obrázku č. 14

Obr. 13: Osazení zkušební tělesa s průhyboměrem



Zdroj: [88] ČSN 73 6174, (1994). Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem.

Naměřené průhyby a vyvozená síla se poté dosadí do vzorců pro výpočet modulu pružnosti v tahu ohybem a modulu přetvárnosti v tahu ohybem.

Modul pružnosti v tahu ohybem E

$$E = \frac{F \cdot l}{f_e \cdot b \cdot h} \left(0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46 \right)$$

Modul přetvárnosti v tahu ohybem E_0

$$E_0 = \frac{F \cdot l}{f_{tot} \cdot b \cdot h} \left(0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46 \right)$$

Kde: F ... zatížení trámce [N]

f_e ... pružný průhyb trámce [mm]

f_{tot} ... celkový průhyb trámce [mm]

b ... šířka trámce [mm]

h ... výška trámce [mm]

l ... rozpětí trámce [mm]

[88]

2.4 Příklady využití vláknobetonu v praxi

Vlákna využíváme všude tam, kde chceme zvýšit dynamickou tuhost betonu, odolnost proti rázu, omezit smršťování nebo zajistit protipožární ochranu. [26]

Jako praktický příklad můžeme uvést například využití polypropylenových vláken PM 12/18 v prefabrikovaných dílcích ostění tunelu. Na obr. č. 15 je ukázka připravené formy s betonářskou výztuží, která bude plněna připraveným vláknobetonem a obrázku č. 16 zachycuje již uložené dílce.

Obr. 14: Formy s betonářskou výztuží připravené na zalití vláknobetonem



Zdroj: [26] Bartoš, P. JM., (2012). Vláknobeton. BETON TKS.

Obr. 15: Ostění tunelu z prefabrikovaných dílců s PP vlákny



Zdroj: [26] Bartoš, P. JM., (2012). Vláknobeton. BETON TKS.

Užití nachází vláknobeton také při stavbě tenkostěnných skořepin, či u netradičně tvarovaných prvků, kde není možné užít dostatečné množství betonářské výztuže. Polymerní vlákna také užíváme u betonu, kde je kamenivo nahrazeno recyklovanou drtí betonu nebo keramiky. V tomto případě je přidáním vláken dosaženo trvanlivější

a spolehlivější konstrukce. Příkladem užití této směsi mohou být konstrukce hrází a náspů, kdy vlákna zvyšují životnost při přelití například při povodni. [27]

Zvláštním příkladem aplikace vláknobetonu je jeho použití v plovoucích tělesech. Testování těchto těles proběhlo pro záměr vytvoření plovoucích ostrůvků pro hnízdění ohroženého druhu ptactva. Může být, ale použito například pro rybáře, nebo jako plovoucí plošiny pro těžební stroje. Zmíněná tělesa jsou šestihranného tvaru, ze skořepiny s tloušťkou stěny 60 mm. Bylo využito velmi lehce zhutnitelného vláknobetonu „easycrrete“ vyztuženého vysokomodulovými plastovými makrovláknem. [28]

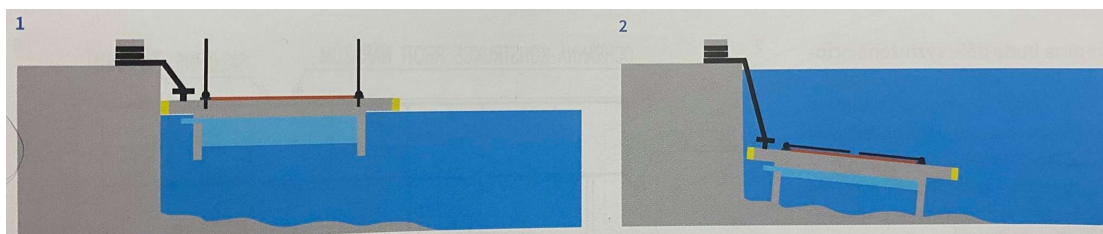
Obr. 16: Plovoucí ostrůvek na rybníku u Tovačova



Zdroj: [28] Vodička, J., Veselý, V., Broukalová, I., Lorek, K., (2010). Plovoucí ostrůvek. BETON TKS

Další možností využití plovoucího betonu je experimentální konstrukce ponorného mola. Jedná se o dutou skořepinu z vláknobetonu vyztuženého PP makrovláknem Forta Ferro 54 mm v množství 4,8 kg/m³. Jedná se o řešení plovoucích mol, které se v případě povodňového nebezpečí nemusí odvážet do bezpečného skladiště. Namísto toho se vyfoukne vak uprostřed konstrukce a molo se ponoří na dno vodní nádrže. Autoři projektu předpokládají užití například pro rozšíření prostoru pražské Náplavky. [100]

Obr. 17: Ponorné molo 1) s nafouknutým vakem, 2) vyfouknutým vakem



Zdroj: [100] Buchlák, J., Matějka, J., Ryjáček, P., Bílý, P., Procházka, J., Pollert, J., Fabel, J., (2020). Experimentální ověření funkčnosti ponorného mola z vláknobetonu.

Vláknobeton je s úspěchem využíván také pro silniční vozovky. Vozovka z betonu s přidanými PES nebo PP vlákny představující efektivnější řešení než běžně užívané betonové vozovky. Vláknina omezuje vznik trhlin při počátečním tvrdnutí, ale také při plastickém sedání. Zvyšují pevnost v tahu a celkovou odolnost vozovky, stejně jako omezuje průsak vody betonem. Vláknobetonové vozovky také vykazují větší odolnost proti nárazu, zlepšují homogenitu a pomáhají vytvořit celistvý povrch. Na rozdíl od přidávání ocelových vláken u polymerních vláken nehrozí žádné riziko koroze. [29]

Za zmínku rozhodně stojí použití PP vláken v římsovém prefabrikátu na mostní konstrukci. Jedná se většinou o prefabrikáty, neboť ta nabízí vyšší možnost kontroly kvality výroby a rozmísení vláken.

Obr. 18: Betonáž mostního římsového prefabrikátu s PP vlákny



Zdroj: [104] Broukalová, I., (2020). Ozvěny workshopu Fibre concrete.

Polymerní vlákna také slouží jako výhodná náhrada výztuží v prvcích vystavených vlhkosti a dlouhodobému styku se zeminou. Klasická ocelová výztuž nezajistí v těchto podmínkách s rizikem koroze dostatečnou životnost, proto je vhodné ji nahradit nekorodující variantou.

Obr. 19: Osazení prefabrikovaného dílce opěrné stěny z vláknobetonu



Zdroj: [104] Broukalová, I., (2020). Ozvěny workshopu Fibre concrete.

Pro mostní konstrukce byly také navrženy PVA vlákna Master Fiber 401 od společnosti BASF, použité pro tenkostěnné komplikovaně tvarované modely mostovek pro soutěž pořádanou v Japonsku. [101]

Obr. 20: Hotový model vyztužený PVA vlákny MasterFiber 401 12 mm



Zdroj: [101] Salák, M., Frantová, M., (2020). Návrh a výroba modelu mostu inspirovaného origami.

3 VLIV POLYMERNÍCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

Přidání vláken do betonu ovlivní určité vlastnosti výsledného kompozitu. Přidávaná vlákna můžeme rozdělit na dvě skupiny, podle toho, jaké vlastnosti ve výsledném kompozitu ovlivní. První skupinou budou vlákna, která přidáváme za účelem omezení objemových změn, a to především smršťování. Do této skupiny patří vlákna měkká, ohebná, nejčastěji polymerní, ale i organická nebo skleněná. Tyto vlákna musí splňovat požadavek na vysokou jemnost vlákna. Tím je zabezpečeno husté vyztužení výsledného betonu i při relativně malé dávce vláken. Do druhé skupiny řadíme vlákna s dostatečnou pevností, tuhostí a modulem pružnosti. Nejčastěji se jedná o vlákna ocelová, skleněná a v posledních letech i uhlíková. Tato vlákna přidáváme pro zlepšení mechanických vlastností, a to především zlepšení pevnosti v tahu. [24]

3.1 Porovnání vlastností vláknobetonu s vlastnostmi kompozitů bez vláken

3.1.1 Fyzikální vlastnosti

Zpracovatelnost

Při přidání polymerních vláken můžeme s jistotou očekávat výrazné zhoršení zpracovatelnosti směsi. Studie Yapa a kol. ukázala, že zpracovatelnost čerstvého betonu s přídatkem PP mikro vláken je závislá na geometrii daného vlákna. Fibrilovaná vlákna vykazují výrazně lepší zpracovatelnost než vlákna multifilamentní. [32] Podobná studie ukazuje, že přídatkem vlnitých PP makrovláken došlo k značnému snížení sednutí kužele při zvýšení dávky vláken z 0,3 % na 1,3 %. Mazoli ve své práci uvádí, že u makrovláken záleží na množství spíše než na jejich geometrii. [33] Protože PP i PE vlákna jsou hydrofobní, jejich vliv na zpracovatelnost je obdobný. Naopak PVA vlákna jsou hydrofilní, proto zhoršují zpracovatelnost více. [31]

Saje a kol. studovali vliv navlhčení PP vláken před přidáním do mixu, došel ale k závěru, že výsledek tímto nezlepší. [41] Jiná studie se zabývala přidáním PP vláken do lehkých betonů. Zde je negativní účinek ještě zřetelnější. Mazaheripour [34] uvádí, že přídatek 0,3 % PP vláken zhorší tekutost až o 40 %.

Dále se téměř všechny studie shodují na tom, že mikrovlákná mají větší vliv na zhoršení zpracovatelnosti než makrovlákná. Je to způsobeno větším měrným povrchem jemných vláken, což má za následek vyšší kohezi a soudržnost betonové směsi. [31]

Hmotnost a hustota

Vzhledem k nízkému procentu dávkování vláken není objemová hmotnost téměř ovlivněna. Například přidání 0,44 % PP vláken sníží objemovou hmotnost asi o 3,3 %. [35]

Obsah vzduchu

Jak již bylo zmíněno dříve, přídavek vláken zvyšuje obsah vzduchu v čerstvém betonu. Lee a kol. ale zjistili, že přidání PP vláken do množství 0,1 % téměř neovlivní množství vzduchu ve směsi. Přidání vyššího množství vláken obsah vzduchu už ale poměrně výrazně zvyšuje. [36] Výsledky zkoušek provedených Genselem a jeho týmem prokázaly, že přídavek 1,2 % vláken zvýší obsah vzduchu až o 2 % vzduchu. [37] Přídavek PE vláken nárůst obsahu vzduchu ovlivňuje o něco méně. [31]

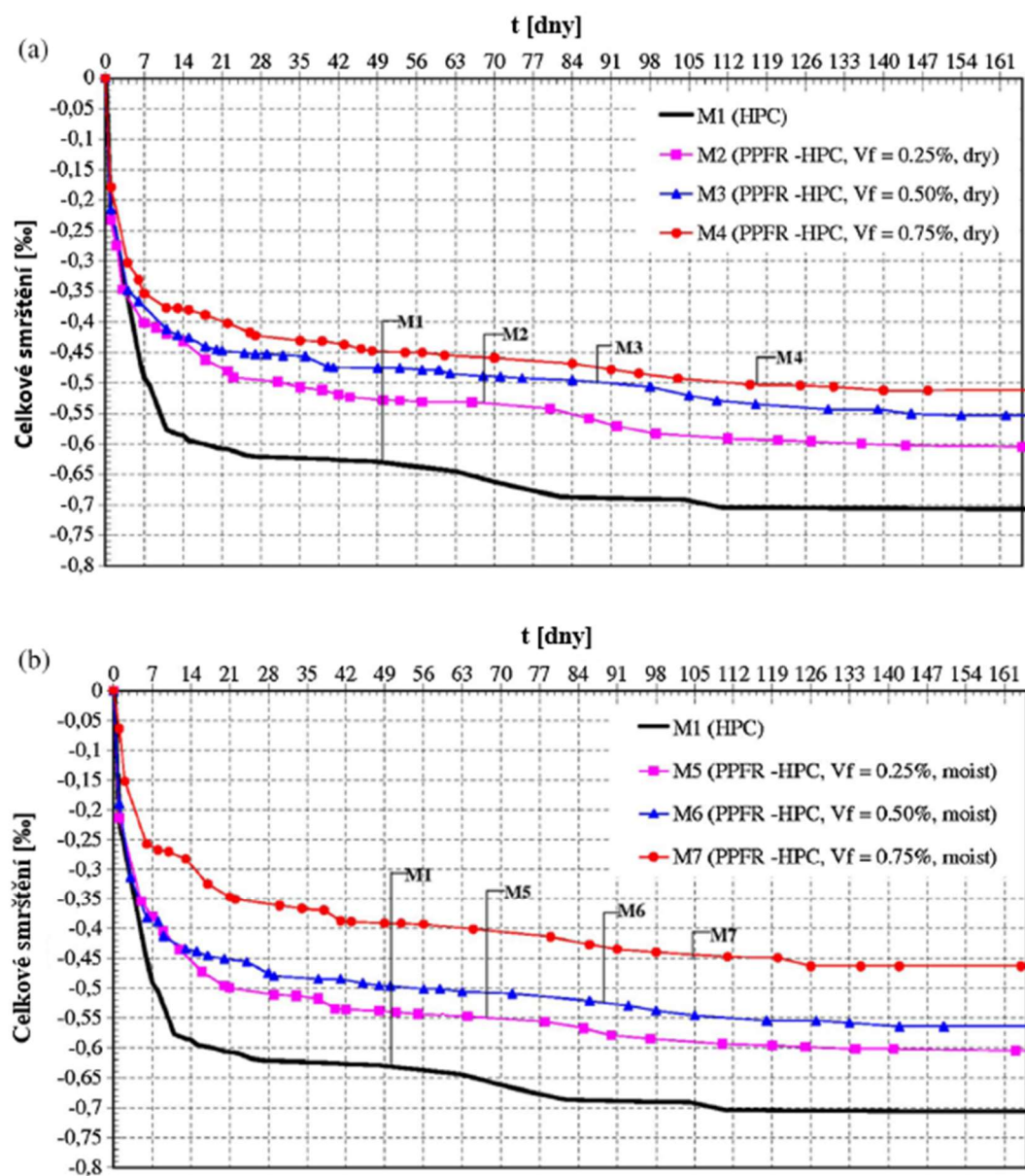
Smršťování

Omezení vzniku trhlin je jedním z hlavních důvodů, proč polymerní vlákna do betonu přidáváme. Trhliny umožňují proniknutí různých agresivních látek do betonu, což může způsobovat korozi jak cementové matrice, tak ocelové betonářské výztuže. Výsledky zkoušení několika různých dávek PP vláken provedené Wongtanakitcharonem a Naamanem ukázaly, že hlavní parametry různých vláken jako modul pružnosti, pevnost v tahu, či povrchová úprava téměř neovlivní výsledek omezení smrštění v počáteční fázi smršťování betonu. [38] Například PP vlákna v množství 0,5 % omezí plastické smrštění o cca 98 %. [39] Dále je prokázáno, že užití mikrovláken je výrazně efektivnější než použití makrovláken. Aly a kol. ale poukázali na fakt, že přídavek PP vláken může urychlit vysychání betonové směsi až o 1 den, v důsledku jejich hydrofobních vlastností. [40]

Saje a kol. se zabývali přidáním PP vláken do HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete). Zjistili, že přidání předem navlhčených PP vláken sníží počáteční smrštění, oproti využití suchých PP vláken, vlivem retence vody z navlhčených vláken. Toto porovnání je znázorněno na grafu č 2 [41]

Graf 2: Celkové smrštění HPFRC s přidavkem (a) suchých PP vláken, (b) vlhčených PP vláken

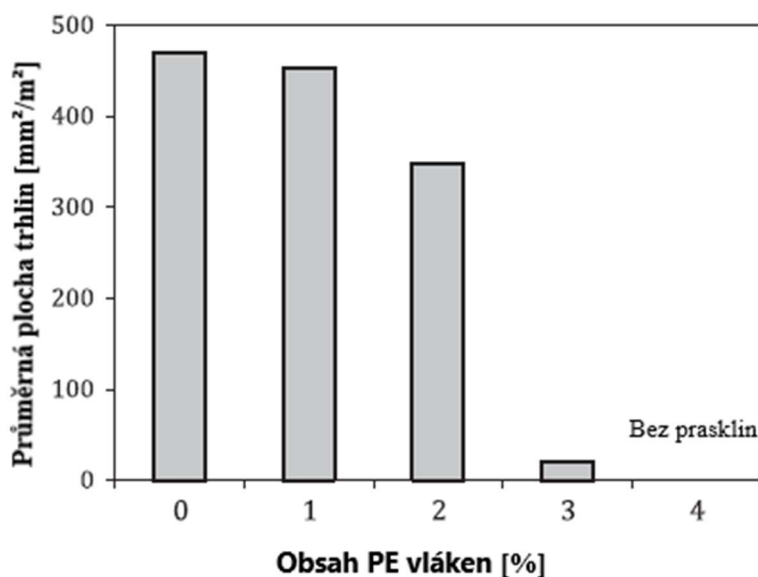
Dry = suchá vlákna, moist = vlhká vlákna



Zdroj: [41] Saje, D., Bandelj, B., Šušteršič, J., Lopatič, J., Saje, F., (2011). Shrinkage of polypropylene fiber-reinforced high-performance concrete. (přeloženo)

Přídavek 0,3 % PE vláken omezí smrštění vysycháním až o 81 %. [33] Přidání HDPE (High Density Polyethylene) v množství 0,04-1,25 % výrazně omezí počáteční plastické smrštění a omezí šířku vzniklých trhlin až o 50 %. [42]

Graf 3: Vliv obsahu PE vláken na průměrnou plochu trhlin na 1 m²



Zdroj: [76] Alhozaimy, A.M., Shannag, M.J., (2009). *Performance of concretes reinforced with recycled plastic fibers*. (přeloženo)

PVA vlákna díky velmi silnému spolupůsobení mezi matricí a vláknem výrazně omezí všechny druhy smršťování a omezí množství trhlin. [43] Přidání PVA makrovláken omezí šířku trhliny až o 90 %. Při přidání mikrovláken je omezení šířky trhliny asi 70 %. [44]

3.1.2 Vlastnosti spojené s odolností

Nasákavost

Bylo pozorováno, že přidavek PP vláken omezí nasákavost betonu. Vlákná nasákavost omezují až do určité, optimální hodnoty, po které při dalším zvyšování množství vláken už nasákavost opět roste, z důvodu větší nehomogenity a vyšší porozity, vzniklé vyšším množstvím vzduchových pórů. Afroughsabet a Ozbakkaloglu uvedli, že přidavek PP mikrovláken v dávce 0,45 % omezí nasákavost asi o 20 %. [56] Jiná studie uvádí, že přidavek PP makrovláken o podobné dávce téměř neovlivní nasákavost betonu v porovnání s běžným betonem. Při vyšší dávce (1,6 %) ale sníží nasákavost asi o 5-12 %. [55] Přidavek jak PE, tak PVA vláken přináší podobné výsledky, jako přidání PP vláken. [31]

Průsak vodou

Jak uvádí Ramezianpour a kol. ve své publikaci, s rostoucím množstvím PP vláken se snižuje propustnost betonu. [35] Přidavek PP vláken už v množství 0,12 % sníží

propustnost betonu pro vodu minimálně o 20 %. [64] Tento efekt je zapříčiněn primárně schopní PP vláken omezovat trhliny v betonu. [31]

Pesic a kol. uvádí, že přidavek PE vláken v rozmezí 0,4 % až 1,25 % omezí průsak až o 80 % v porovnání s prostým betonem. [42] Bylo prokázáno, že přidavek PE mikrovláken omezí koeficient průsaku dokonce i v prasklém FRC. Vliv přídavku PVA vláken není tak výrazný jako u předchozích druhů polymerů. [31]

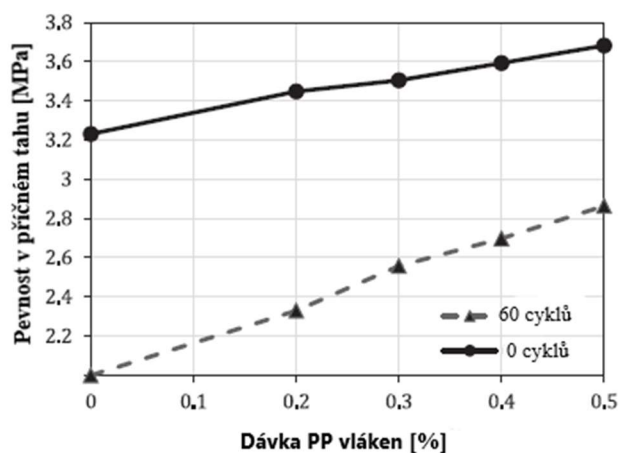
Karbonatace

Medina a kol. se zabývali působením přídavku PP vláken na karbonatace povrchu betonu. Prokázali, že přidavek vláken v dávce 0,1 % zmenšil hloubku karbonatace o 43 %. Přidavek velkého množství PP vláken ale naopak zhorší odolnost proti karbonataci. [63]

Vliv zmrazování a rozmrazování

V důsledku opakovaného zmrazování a rozmrazování dochází ke snížení pevnosti v tlaku i tahu betonu. Přidavek PP vláken může tento efekt zmírnit. Ve studii, kterou provedl Cavdar a kol. prokázali, že po 100 cyklech zmrazování klesla pevnost v tahu betonu o 22 %. Přidavek 0,4 % PP vláken za stejných podmínek zmírnit dopad zmrazovacích cyklů a pevnost v tahu byla snížena pouze o 14 %. [65] Bylo prokázáno, že pozitivní vliv PP vláken na tuto odolnost je umocněn přídavkem popílku do směsi. Graf č. 4 znázorňuje vliv přídavku PP vláken v množství 0 – 0,5 % na pevnost betonu v příčném tahu po 60 cyklech zmrazování a rozmrazování. [31]

Graf 4: Pevnost v příčném tahu po 60 cyklech zmrazování a rozmrazování pro různé dávky PP vláken



Zdroj: [58] Nili, M., Azarioon, A., Danesh, A., Deihimi, A., (2016). *Experimental study and modeling of fiber volume effects on frost resistance of fiber reinforced concrete* (přeloženo)

Přídavek PE vláken ovlivní snížení pevností o něco méně než PP vláken. Přídavek 1,5 % PE vláken po 100 a 200 cyklech mírně zlepšil ztrátu pevnosti, po 200 cyklech ale došlo k rapidnímu poklesu pevnosti. [47] Naopak přídavek PVA vláken už v množství 0,4 % po 100 cyklech vedl ke snížení pevnosti v příčném tahu o 8,6 %, kdežto u prostého betonu to bylo o 22,6 %. [65]

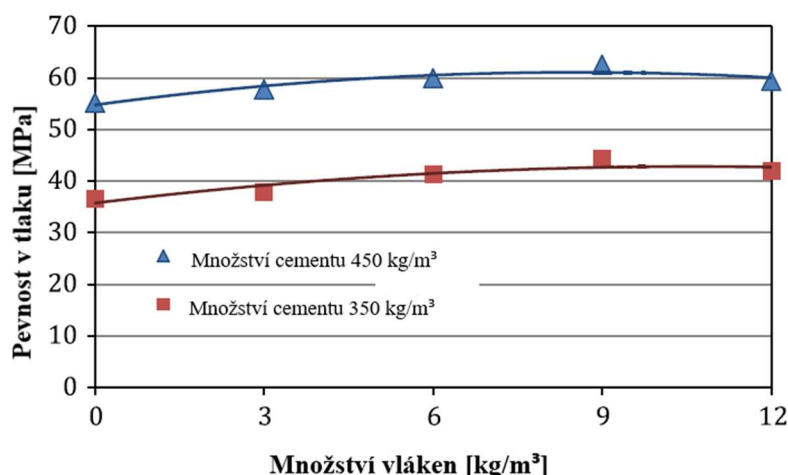
3.1.3 Mechanické vlastnosti

Pevnost v tlaku

Zhang a kolektiv testoval přídavek PP mikrovláken spolu s přidáním křemičitých úletů a popílku a jako výsledek uvedl, že ve všech dávkách vlákna snížila pevnost v tlaku betonu. Navíc je prokázáno, že vlákna v dávce vyšší než 0,1 % snižují pevnost výrazněji. [59] Cavdar uvádí, že přídavek PP mikrovláken z dávce 0,4 % snižuje pevnost o 7,5 % a dávka 1,2 % tuto pevnost snižuje až o 18,3 %. [65] Naopak Simoes a kol. prokázal, že PP mikrovláka mohou pevnost v tlaku mírně zvyšovat. Jedná se ale o betony s lehkým kamenivem, nebo pouze jemnými a drobnými zrny kameniva. [60]

Přidání PP makrovláken do prostého betonu nemá téměř žádný efekt dle Behfarnia a Behravana. [62] Výrazně ale zlepšuje pevnost v tlaku betonu lehčeného pěnou. Zde 0,8 % PP makrovláken zlepšilo pevnost v tlaku až o 45 %. [61] Nárůst pevnosti také zaznamenáváme při užití v samozhutnitelném betonu. Přidání PP makrovláken do SCC zlepšilo jeho pevnost v tlaku o 12-14 % dle množství vláken. Závislost je znázorněna na grafu č. 5 [31]

Graf 5: Vliv množství PP makrovláken na pevnost v tlaku FRSCC



Zdroj: [37] Gencil, O., Ozel, C., Brostow, W., Martínez-Barrera, G., (2011). *Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibers.* (přeloženo)

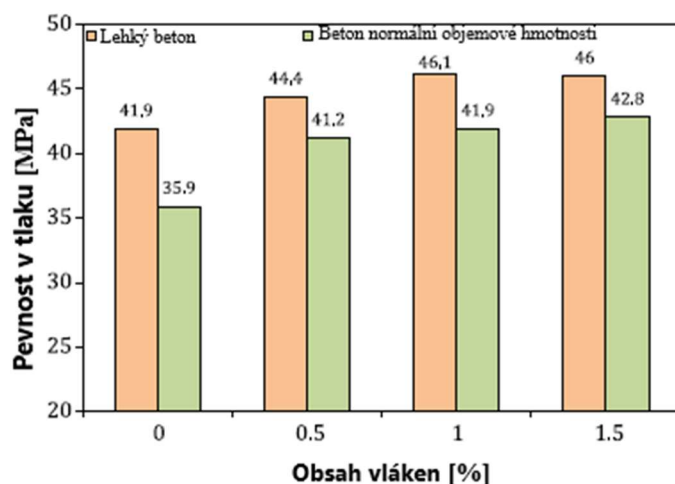
PE mikroválkna vykazují po přidání v betonu jiné výsledky než PP. Přidání PE vláken do lehkého betonu pomáhá vytvořit výrazně lehčí beton (až o 38 %) s pevností v tlaku obdobné betonu o normální hmotnosti. Toto ale platí pouze pro PE vlákna v dávce do 1,5 %. Přidání vyšší dávky již výrazně snižuje pevnost v tlaku. [68] Při přidání 1,5 % - 2 % mikrovláken z PE do HPC (High Performance Concrete) docílíme betonu o výrazně vyšší pevnosti v porovnání s běžným HPC. Po přidání vyšší dávky se pevnost výrazně sníží, pořád ale bude o něco vyšší než ta běžného betonu. [67]

Přidání PE makrovláken snižuje pevnost betonu v závislosti na množství vláken. Je prokázáno, že se zvyšujícím se indexem vyztužení vlákny se snižuje pevnost v tlaku až o 25 %. [66]

Vliv přídavku PVA vláken není tak jednoznačný. Pan a kol. udávají, že přídavek 1,2 % PVA vláken sniží pevnost betonu v tlaku až o 9,6 % a o něco vyšší dávka 1,4 % sniží pevnost dokonce o 32,3 %. [46] Přídavek PVA vláken v dávce pod 0,5 % ale může zlepšit pevnost v tlaku asi o 11,6 %.

Cavdar také zkoumal vliv PVA makrovláken. Ve své práci publikoval závěr, že přidáním PVA makrovláken v dávce 0,5-1,5 % snížilo pevnost betonu z 61,73 MPa (referenční vzorek) na 39,19-47,8 MPa. [65] Choi a kol. zveřejnili práci, která vypovídá o nárustu pevnosti s rostoucím množstvím PVA makrovláken. Tento nárůst je ale omezen určitou maximální dávkou, po které bude pevnost opět klesat. Všechny výsledky budou ale stále výrazně nižší než ty zjištěné na betonu bez vláken. Lehký beton je poklesem pevnosti oproti běžnému betonu ovlivněn méně, viz graf č. 6 [68]

Graf 6: Vliv množství PVA makrovláken na pevnost v tlaku betonu



Zdroj: [68] Choi, J., Zi G., Hino, S., Yamaguchi, K., Kim, S., (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. (přeloženo)

Chování betonu s přidavkem polymerních vláken v tahu

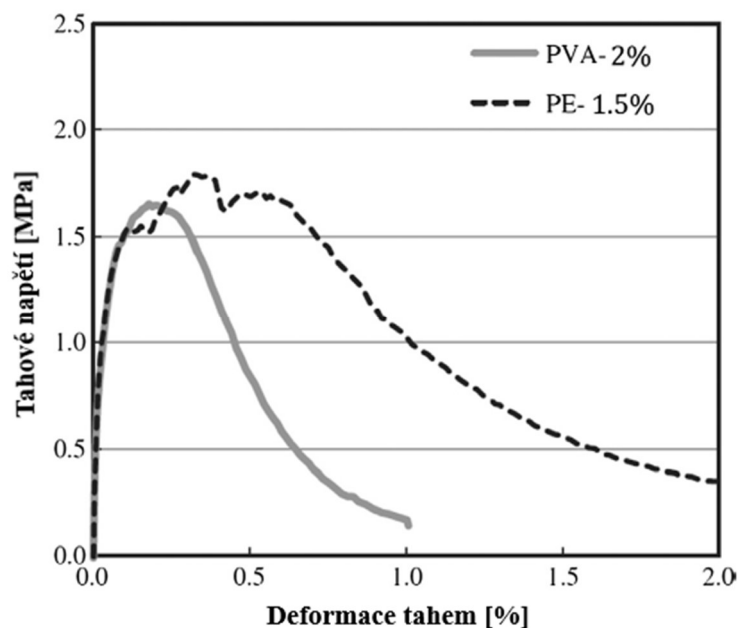
Fallah a Nematzadeh porovnávali vliv PP mikro a makro vláken na pevnost v příčném tahu. Výsledek jejich výzkumu ukázal, že pro přidání mikrovláken z PP je ideální dávka 0,2 %, která zvýší pevnost v příčném tahu o maximálně 12,8 %. Makrovlákna je vhodné dávkovat až do množství 1,25 %. Díky tomu zlepší makrovlákna danou pevnost až o 27,4 %. [69] Přídavek PP mikrovláken v množství 0,45 % zvýšil pevnost v tahu vysokopevnostního betonu asi o 7 %. [56] Z několika výzkumů je tedy zřejmé, že množství mikrovláken větší než 0,2 % snižuje pevnost v příčném tahu. [31]

Behfarnia a Behravan také porovnávali užití PP makrovláken s užitím ocelových vláken. PP makrovlákna vykazala téměř obdobné zlepšení pevnosti v tahu jako u betonu s ST (Steel) vlákny. PP vlákna zajistila dokonce vyšší absorpci energie a tažnost než u vzorků s ST vlákny. [62] Alberti a kol. prováděli zkoušky na SCC s přidanými PP vlákny a zjistili, že FRSCC s PP vlákny prokázalo téměř stejnou pevnost v příčném tahu jako vzorky s ST vlákny se zahnutým koncem. Ocelová vlákna s koncovou úpravou mají ale lepší spolupůsobení s cementovou matricí, a proto vykazují vyšší pevnost v tlaku a nepřímou pevnost v tahu. [54]

Choi a kol. vytvořili HPFRC s užitím vysoko modulových PE vláken. Výsledný beton vykázal pevnost v tahu až 9,5 MPa. [48] Obdobná vlákna v dávce 1 % až 2 % byla použita ve studii HPFRC zatěžovaného multiaxiálním tlakovým zatížením. Výsledná pevnost v tahu byla až 4x vyšší než u prostého betonu pod stejnou zátěží. [67]

Bylo provedeno porovnání vlastností pevnosti v tahu a protažení u PE a PVA vláken provedené Yunem a kol. Výsledky ukázaly, že přidání 1,5 % PE vláken zlepší tahové vlastnosti betonu výrazně více než přídavek 2,0 % PVA vláken. [47] Porovnání tahových vlastností obou vláken je ukázáno na grafu č. 7. Menší schopnost průťahu u PVA vláken je způsobena silnějšími chemickými vazbami, kvůli kterým se vlákno dříve poruší, než aby došlo k výraznějšímu protažení.

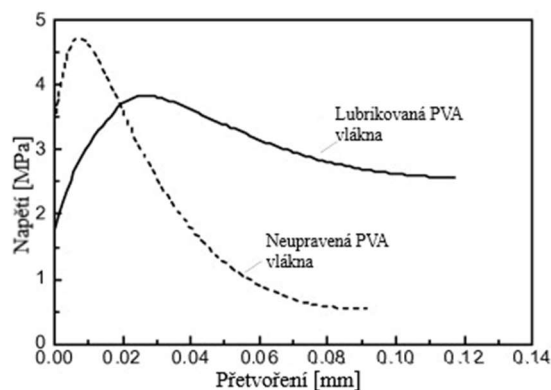
Graf 7: Vliv tahového napětí na PE a PVA vlákna



Zdroj: [47] Yun, H.D., Kim, S.W., Lee, Y.O., Rokugo, K., (2011). *Tensile behavior of synthetic fiberreinforced strain-hardening cement-based composite (SHCC) after freezing and thawing exposure.* (přeloženo)

Přidání PVA vláken výrazně zlepšuje pevnost v příčném tahu už při nízkých dávkách. Přidání 0,25 % 12 mm mikrovláken zlepšilo pevnost v příčném tahu asi o 27 %. [70] Byly dále zkoumány možnosti využití lubrikovaných a nelubrikovaných PVA vláken. Vlákna dodatečně upravená lubrikací se vyrábí s o něco větším průměrem a jsou výrazně dražší. Právě cena omezuje lubrikovaná PVA vlákna v širším užití ve stavebnictví. Kompozity s nelubrikovanými vlákny vykazují vyšší pevnost v tahu, ale nižší protažení před porušením. [46]

Graf 8: Porovnání pracovního diagramu PVA vláken s povrchovou úpravou a bez ní



Zdroj: [46] Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., Liu, J., (2015). *Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites PVA-ECC.* (přeloženo)

Ve studii, kterou provedli Sun a Xu, byly zkoumány účinky PP mikrovláken na pružné chování a houževnatost betonu. Došli k závěru, že přídavek 0,1 % PP mikrovláken mírně zlepši pevnost za ohybu. Naopak houževnatost se přídavkem těchto vláken zvýší značně. Přídavek 0,1 % PP zlepšil tuhost až o 151 %. [57] Přídavek PP mikrovláken do HSC ale téměř neovlivnil ani pružné chování ani tuhost betonu. Přídavek mikrovláken se tedy nejvíce projeví po přidání do lehkých FRC. Ve studii, kterou provedl Yap a kol., došlo k nárustu pevnosti v příčném tahu až o 19 % a pevnosti za ohybu o 45 % při užití fibrilovaných PP mikrovláken. Po použití multifilamentních byl nárůst u obou hodnot více jak 86 % oproti referenčnímu vzorku. [32]

Lanzoni a kol. se zabývali testováním nového typu PP makrovláken pro zlepšení chování betonu za ohybu. Jedná se o spletená PP vlákna. Ty byly speciálně navrženy pro lepší spolupůsobení s cementovou matricí. Při porovnání zmíněných vláken, klasických PP makrovláken a ST vláken došli k výsledku, že nová spletená vlákna zlepšila pevnost za ohybu více než použitá ST vlákna. Autoři proto prohlásili tento nový typ vláken alternativou pro užití klasických ST vláken. [52]

Obr. 21: Spletená PP makrovlákná

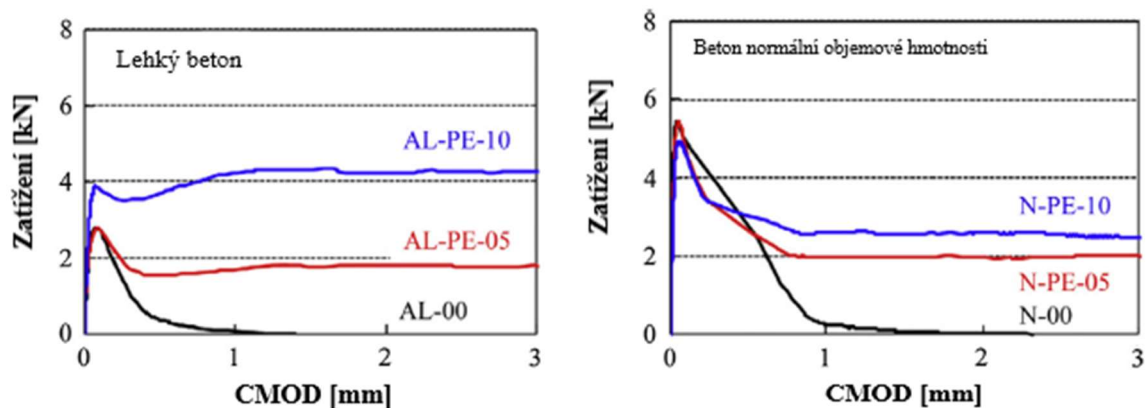


Zdroj: [52] Lanzoni, L., Nobili, A., Tarantino, A.M., (2012). Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures.

Užitím PE vláken do lehkých betonů se zabýval Choi a kol. Prokázali, že přídavkem PE vláken do betonu s maximální objemovou hmotností 1600 kg/m^3 lze získat lehký beton se stejnou pevností v ohybu jako beton normální objemové hmotnosti. Zvýšení této pevnosti bylo dle množství vláken v rozmezí 57-144 %, kdežto u běžného betonu pouze 0-46 %.

Graf č. 9 ukazuje, že zbytková pevnost v tahu ohybem po vzniku trhliny je u lehkého betonu vyšší než u běžného betonu a její velikost přímo závisí na množství PE vláken. [68]

Graf 9: Vliv PE vláken na pružné chování lehkého a normálního betonu



Zdroj: [68] Choi, J., Zi G., Hino, S., Yamaguchi, K., Kim, S., (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. (přeloženo)

Dle Peyvandiho a kol. PVA vlákna zvýší pevnost betonu za ohybu cca o 50 % už v dávce 1,0 %. [74] Při porovnání delších ($l = 12$ mm) PVA vláken s kratšími ($l = 8$ mm) vyjde najevo, že přidavek delších vláken zvýší pevnost za ohybu o něco více než přidavek kratších ve stejné dávce. [31] Hedong a kol. vyvinuli cementový kompozit přidavkem PVA vláken v dávce 2,0 %, který vykázal pevnost za ohybu až 16 MPa a ultra vysokou ohybovou tažnost, díky které se byl schopný ohýbat bez porušení podobně jako ohebné kovy. [73]

Vliv PVA makrovláken také studoval již dříve zmiňovaný Cavdar. Ve své publikaci uvedl vliv přidavku PVA makrovláken v dávkách 0,5, 1,0 a 1,5 %. Ty zvýšily pevnost betonu za ohybu o 23,6, 36,5 a 43,11 % v odpovídajícím pořadí. [75]

Odolnost proti obruš

Přidání PP mikrovláken v množství 0,1 % do cementového kompozitu snížilo porušení obrušem o 13,4 % u fibrilovaných vláken a s přidáním monofilamentních vláken bylo snížení pouze o cca 7 %. [51] Přidání makrovláken má ale opačný účinek. Bolat a kol. zveřejnil práci, ve které udává zhoršení odolnosti proti obruš v porovnání s nevyztuženým betonem. Jako důvod udává rozměr vláken větší, než jsou zrna v matrici a jejich vytržení. [72]

Odolnost při nárazu

Přidání PP mikrovláken pozitivně ovlivní chování vzorku vystaveného nárazu rychle pohybujícího se objektu. To je způsobeno schopností vysoké absorpce energie PP vláken. [31] Tento efekt je možné ještě umocnit přidáním křemičitého úletu do směsi. Ten přímo ovlivní soudržnost vláken s matricí a omezí rozšiřování trhlin. Přídavek úletu zlepší odolnost při nárazu 3 až 10krát. [50]

Pantelides a kol. studovali chování betonových panelů vystavených výbuchům. Uvedli, že nevyztužený beton sílu vyvolanou výbuchem nevydržel. Naopak přídavek PP makrovláken spolu s ocelovou betonářskou výztuží měl za následek zlepšení odolnosti prvku. Bylo pozorováno pouze minimální porušení a praskliny malých rozměrů. [49]

Při užití PE vláken byla také zlepšena schopnost betonu absorbovat energii nárazu a odolnost proti nárazu. Neukázal se ale žádný výrazný rozdíl při porovnání PE a ST vláken. [31]

Jak již bylo zmíněno dříve, PVA vlákna díky své silnější chemické vazbě se dříve přetrhnou, než aby se více protáhla. Proto FRC s PVA vlákny má vyšší schopnost absorpce energie, pokud je použit vyšší vodní součinitel. Atahan a kol. uvádí při w/c 0,35 a dávce 2,0 % PVA vláken absorpci energie o 81 % vyšší než u stejné směsi s w/c 0,2. To je způsobeno slabší vazbou mezi vláknem a matricí při vyšším vodním součiniteli. Tím pádem se může vytáhnout větší množství PVA vláken a tím absorbovat více energie. [71] Při využití PVA vláken v ECC (Engineered Cementitious Composite) panelech, již dávka 0,25 % zvýší možnou absorpci energie o více jak 50 %. Po zvýšení dávky na 0,9 % je potenciální navýšení absorpce až na 115 %. [45]

3.2 Nové trendy v aplikaci polymerních vláken do cementových kompozitů

V posledních letech vlákna nachází čím dál širší využití a přidávají se za účelem zlepšení specifických vlastností. Těmito novými trendy se zabývá následující kapitola. Je rozdělena na několik částí, z nichž každá krátce představuje nový trend v používání polymerních vláken v cementové matici.

3.2.1 Odolnost vláknobetonu proti vysokým teplotám

Beton má relativně nízký koeficient tepelné vodivosti, většinou kolem $1,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Díky tomu se teplo v betonu pohybuje pomalu a při požárů dochází k velkým rozdílům teplot na povrchové části konstrukce a uvnitř. Tím je sice poměrně dobře chráněna ocelová výztuž, vzniklým napětím z rozdílů teplot však může docházet k explozivnímu oprýskání betonu. Další příčinou je také vliv odchodu vodní páry. Při změně skupenství z kapalného na plynné se voda rozpíná a tím vznikají dodatečná tahová napětí. Pokud vzniklé napětí překročí únosnost betonu v tahu, dochází k rozvoji trhlin paralelně s povrchem. Při překročení únosnosti může dojít k náhlému uvolnění energie a explozivnímu odprýskávání betonu z povrchu. [30]

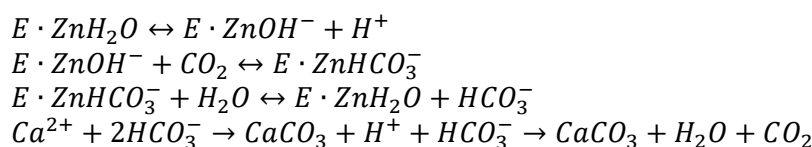
Přidání vláken může toto působení vysokých teplot pozitivně ovlivnit. Nejčastěji se za tímto účelem přidávají PP vlákna. Při teplotách vyšších než cca 160°C se PP vlákna roztaví a do nově vzniklých pórů po vláknech se uvolní tlak, který by jinak porušil strukturu betonu. [30]

3.2.2 Vliv vláken na samohojení cementových kompozitů (self-healing)

Významným požadavkem dnešní doby je podmínka dodávat bezpečné stavby s co největší životností. Porušení betonových konstrukcí vznikem trhlin je hlavním důvodem jejich degradace. Trhlinami se do konstrukce mohou dostat agresivní látky a vlhkost. Ty poté způsobují jak degradaci betonu, tak i ocelové výztuže. Sanace betonových konstrukcí jsou náročné a také nákladné. Jako ideální řešení se tedy jeví vyvinout konstrukce se samohojící schopností. [92]

Samohojení betonu je známé již léta, ale jeho účinnost je poměrně limitovaná. Jedním z prvních principů bylo využití dodatečné hydratace cementových částic, uměle vyvolané karbonatace nebo přidání kapsulí obsahujících hydroxid vápenatý či jiné krystalizující látky. Ty mají za následek dodatečný vznik C-S-H gelů pro zaplnění vzniklých trhlin. Další možností je přidavek expandujících látek jako je bentonit nebo oxid hořečnatý. Tyto způsoby jsou sice ekologické, ale jejich potenciál je poměrně nízký. Dle různých výzkumů je udávána maximální šířka, kterou jsou schopni překlenout, do 500 μm . [92]

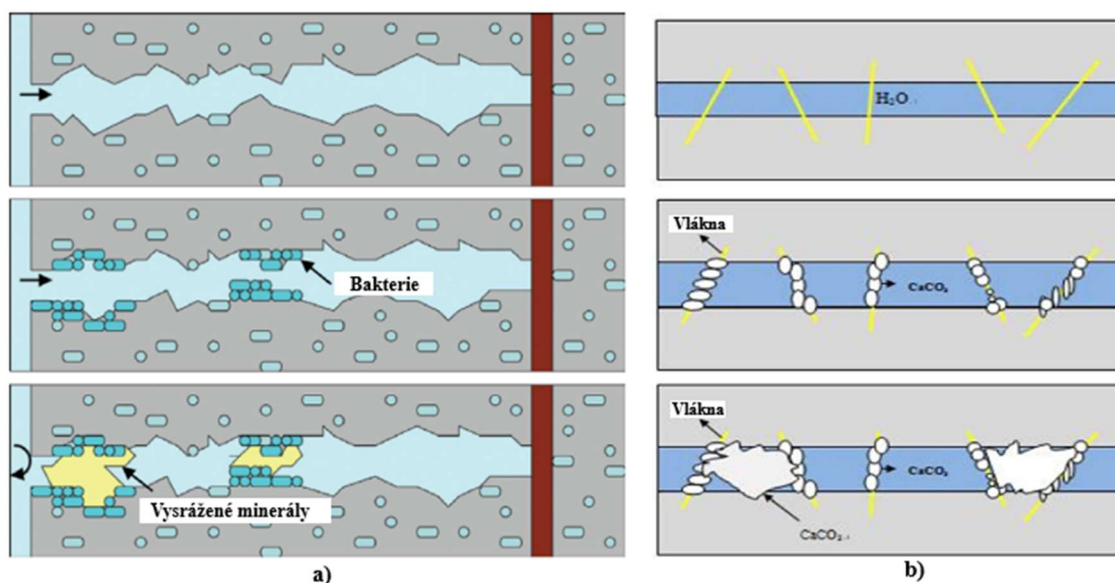
Dalším principem je samohojení betonových konstrukcí vlivem mineralizace, způsobeným především bakteriemi. Wang a kol. studovali vliv přídavku močovinných bakterií do betonu a prokázali schopnost zacelení trhliny široké až 970 μm . Navíc průsak vody prokázali až 10krát nižší než u stejně porušeného betonu bez přídavku bakterií. [90] Naneštěstí amoniak produkovaný bakteriemi zvyšuje obsah dusíku, což rozhodně není ekologické. Nynější trendy a požadavky na co nejekologičtější zacházení s materiály z toho dělají poměrně velkou překážku. Qian a kol. testovali účinek bakterií, které jsou schopny zajistit vzájemnou přeměnu oxidu uhličitého na hydrogen uhličitán. [91] Toto je zajištěno OH^- skupinou spojenou se zinkem. Proces probíhá dle vzorce: [93]



Vzniklý uhličitán vápenatý poté přemostí trhliny, snižuje jejich šířku, zvyšuje nepropustnost vodou a mírně zlepší pevnost v tahu ošetřovaného betonu. [92]

Růst krystalů a zaplňování prasklin ale probíhá pouze po okrajích trhliny a až po delší době může dojít v některých místech ke spojení protilehlých stěn. Přidání vláken do betonu a přemostění trhliny vlákny může sloužit jako dodatečná plocha, na které mohou krystaly růst a rychleji se propojit. Obrázek č. 23 znázorňuje princip hojení trhliny s přídavkem bakterií a vláken. Nejčastěji používaná vlákna pro podporu samohojení jsou PP a PVA vlákna. Z těchto dvou poskytují PVA vlákna výrazně lepší výsledky. [92]

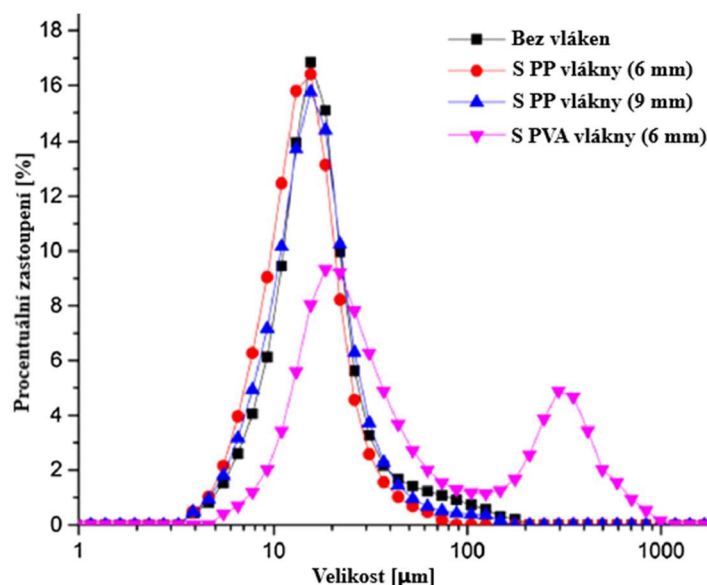
Obr. 22: Proces samohojení založený na přítomnosti a) bakterií b) vláken



Zdroj: [94] Jonkers, H., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen E., (2008). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, in: Proceedings of 1st international conference on biogeocivil engineering. (přeloženo)

Při porovnání velikosti krystalů můžeme říct, že přidavek PP vláken neovlivní velikost vzniklých částic v porovnání s prostým betonem pouze s bakteriemi. Na druhou stranu po přidavku PVA vláken pozorujeme na grafu č. 24 množství krystalů i výrazněji většího průměru. [92]

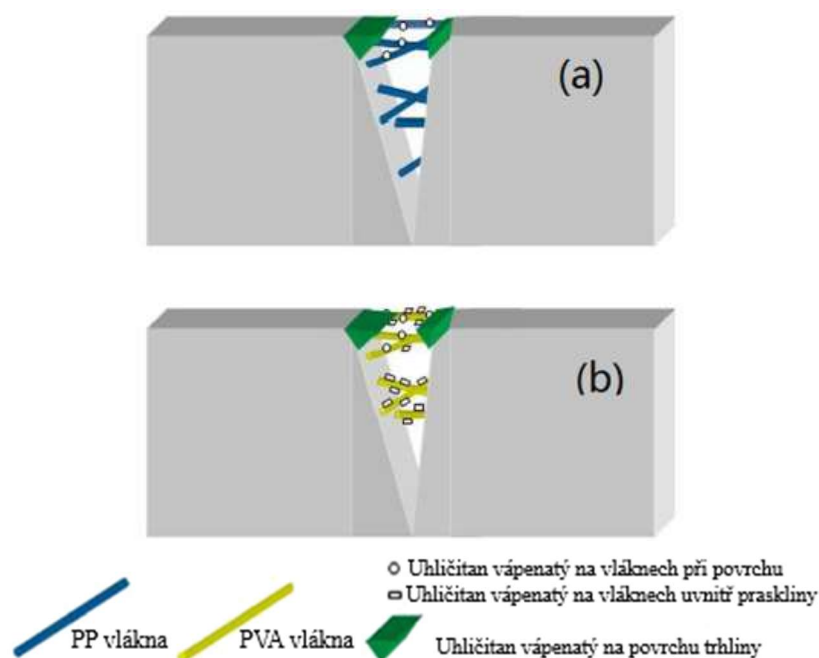
Obr. 23: Procentuální zastoupení krystalů daných velikostí



Zdroj: [92] Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Kombinace vláken a bakterií ukazuje výrazně vyšší stupeň zahojení betonu oproti přidání pouze vláken. Na druhou stranu vzorky obsahující pouze bakterie prokázaly lepší samohojící vlastnosti než vzorky obsahující bakterie v kombinaci s vlákny. Tento na první pohled negativní dopad přídavku vláken je ale vyvrácen celkovým zlepšením nepropustnosti betonu s vlákny a bakteriemi v porovnání s pouze bakteriemi. Také zlepšení výsledné pevnosti v tahu a možnost přídavku menšího množství bakterií a tím pádem nižší produkce dusíku ukazují na výhody přidání vláken. Při samohození betonu s přidanými PP vlákny a bakteriemi nebo pouze bakteriemi vznikají krystaly uhličitanu vápenatého pouze v horní části praskliny. Jediná PVA vlákna zajistí růst krystalů také uvnitř trhliny, jak je znázorněno na obrázku č. 25 [92]

Obr. 24: Schéma samohození betonu s a) PP vlákna a bakteriemi b) PVA vlákny a bakteriemi



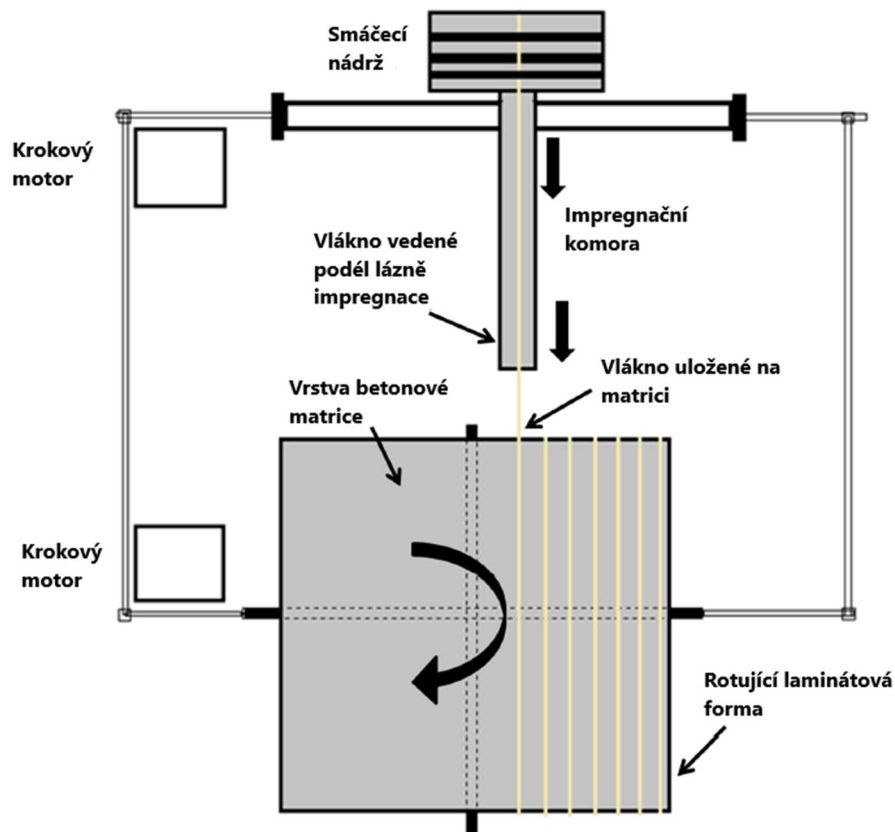
Zdroj: [92] Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

3.2.3 Využití kontinuálních vláken cementových kompozitech

Cementové kompozity odolné vůči deformaci (SHCC – Strain-Hardening Cementitious Composite) s využitím PP vláken představovaly významný průlom pro návrh konstrukcí namáhaných tahem. Vlákná z PP jsou při výrobě motána do svazků a tvoří kontinuální orientovanou strukturu. Svazky jsou splétány z PP vláken různých průměrů a vlastností. Využití nachází především u prefabrikovaných výrobků kvůli poměrně náročné technologii

ukládání, která by se přímo na stavbě prováděla velmi pracně a časově náročně. Obrázek č. 26 ukazuje princip ukládání kontinuálních vláken na prefabrikovaný panel. [95]

Obr. 25: Schéma ukládání kontinuálních vláken na matrici

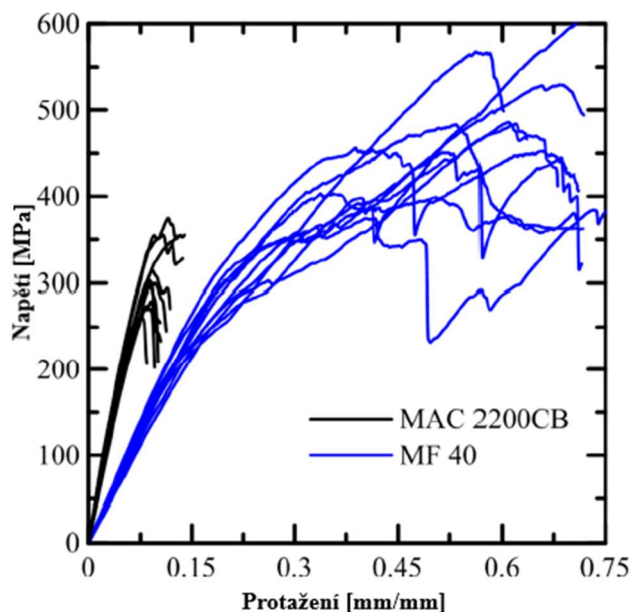


Zdroj: [95] Mobasher, B., Dey, V., Bauchmoyer, J., Mehre, H., Schaef, S., (2019). Reinforcing Eciency of Micro and Macro Continuous Polypropylene Fibers in Cementitious Composites. *Applied sciences*. (přeloženo)

Mobasher a kol. ve své publikaci porovnávají efekt přidavku dvou různých kontinuálních vláken na vlastnosti výsledného kompozitu. První typ je komerčně označován jako MAC 2200CB. Jedná se o monofilamentní PP makrovláknem průměru 0,82 mm. [96] Druhý typ představuje multifilamentní svazek 500 PP mikrovláken, každé s průměrem 40 mikrometrů, označovaný jako MF 40. [95]

Poměr mezi zátěží a protažením je znázorněn na grafu č. 12. Ten ukazuje, že mikrovláknem mají díky spolupůsobení velkého množství vláken vyšší únosnost. Na druhou stranu, právě mikrofilamentní vlákna ukazují výrazně větší deformace před porušením. Celkově můžeme říct, že svazek mikrovláken MF je více jak dvakrát houževnatější než MAC. [95]

Graf 10: Pracovní diagram zvolených kontinuálních mikro a makro vláken. MF – svazek mikrovláken, MAC – monofilamentní PP makrovlákno průměru 0,82 mm.



Zdroj: [95] Mobasher, B., Dey, V., Bauchmoyer, J., Mehre, H., Schaefer, S., (2019). Reinforcing Efficiency of Micro and Macro Continuous Polypropylene Fibers in Cementitious Composites. *Applied sciences*. (přeloženo)

Byly zkoušeny vlivy přidavku zmíněných druhů vláken v množství 1 až 4 %. Se zvyšujícím se množstvím vláken rostly také všechny schopnosti kompozitu. Zatímco při dávce 1 % vykázaly lepší vlastnosti kompozity s přidavkem MAC, u všech vyšších množství vykázaly výrazně lepší výsledky kompozity s MF. Při 4 % MF vláken zkoušky prokázaly zvýšení celkové pevnosti v tahu až o 200 % a modul pružnosti po rozvinutí praskliny až o 400 %. Pevnost v tahu na zkušebních trámcích dosáhla 17,3 MPa. Kompozity s MAC vykázaly mírnější zlepšení, a to asi o 100 % u celkové pevnosti v tahu (13,2 MPa) a 140 % u modulu pružnosti po prasknutí. [95]

Lepší vlastnosti svazku mikrofilamentních vláken jsou dosaženy také díky výrazně silnějšímu spojení s matricí. Právě výrazné zlepšení tahových vlastností PP vlákny je velmi perspektivní z důvodu výrazně nižších nákladů na PP vlákna než na ocel či FRP (Fiber reinforced polymer) výztuže. [95]

Kompozity vyztužené kontinuálními vlákny najdou uplatnění v panelech namáhaných dynamickým namáháním jako například při působení nárazu při vysoké rychlosti

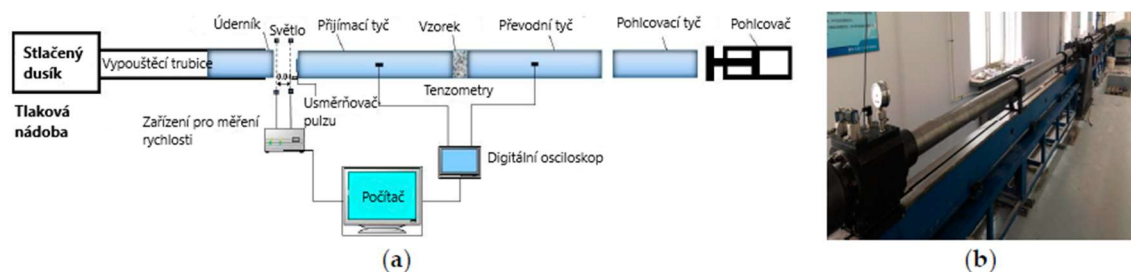
či při porušení výbuchem, také pro vyztužení opěrných zdí či dovyztužení již stávajících konstrukcí, v prefabrikovaných prvcích například u povrchu vozovek a mostních konstrukcí. Do konstrukcí vyztužených ocelí je možné jejich přidání pro omezení smršťování a explozivního oprýskání. [95]

3.2.4 Použití PP vláken pro zlepšení dynamického chování betonu

Běžný beton je křehký materiál, který má sklon k praskání při vystavení dynamickému namáhání, nevhodnému ošetřování, smršťování nebo působení mrazu. Možnost výskytu křehkého porušení je nebezpečná především v oblastech seizmického působení nebo na pobřežích při namáhání vlnami či větrem. Navíc při porušení nárazem vznikají praskliny, které umožňují prostup agresivních médií. Ty mohou dále zhoršovat stav a odolnost konstrukce. Pro omezení těchto nebezpečí lze použít vlákna. Prvními z používaných vláken byla vlákna ocelová, která výrazně zlepšují tahové vlastnosti. Nevýhoda ocelových vláken je jejich náchylnost ke korozi, poměrně vysoká hmotnost a problémy s rozmíslením. Ocelová vlákna je také nepřipustné použít v konstrukcích namáhaných mořskou vodou. V posledních desetiletích jsou využívána PP vlákna – zejména pro jejich nízkou hmotnost, vysokou odolnost proti korozi i nízké ceně, přidávají se také pro zlepšení odolnosti proti dynamickému namáhání. [97]

Vliv přídavku PP vláken v kompozitu na odolnost proti nárazu zkoumal Chen a kol. Zkoumají vliv zvyšujícího se množství vláken ve směsi. Zkoušení se provádí pomocí zařízení označovaným jako SHPB. Přibližný český překlad je Hopkinsonova rozdělená tlaková tyč (Split Hopkinson Pressure Bar). Uspořádání zařízení je znázorněno na obrázku č. 27. [97]

Obr. 26: SHPB testovací zařízení a) schéma b) skutečné zařízení

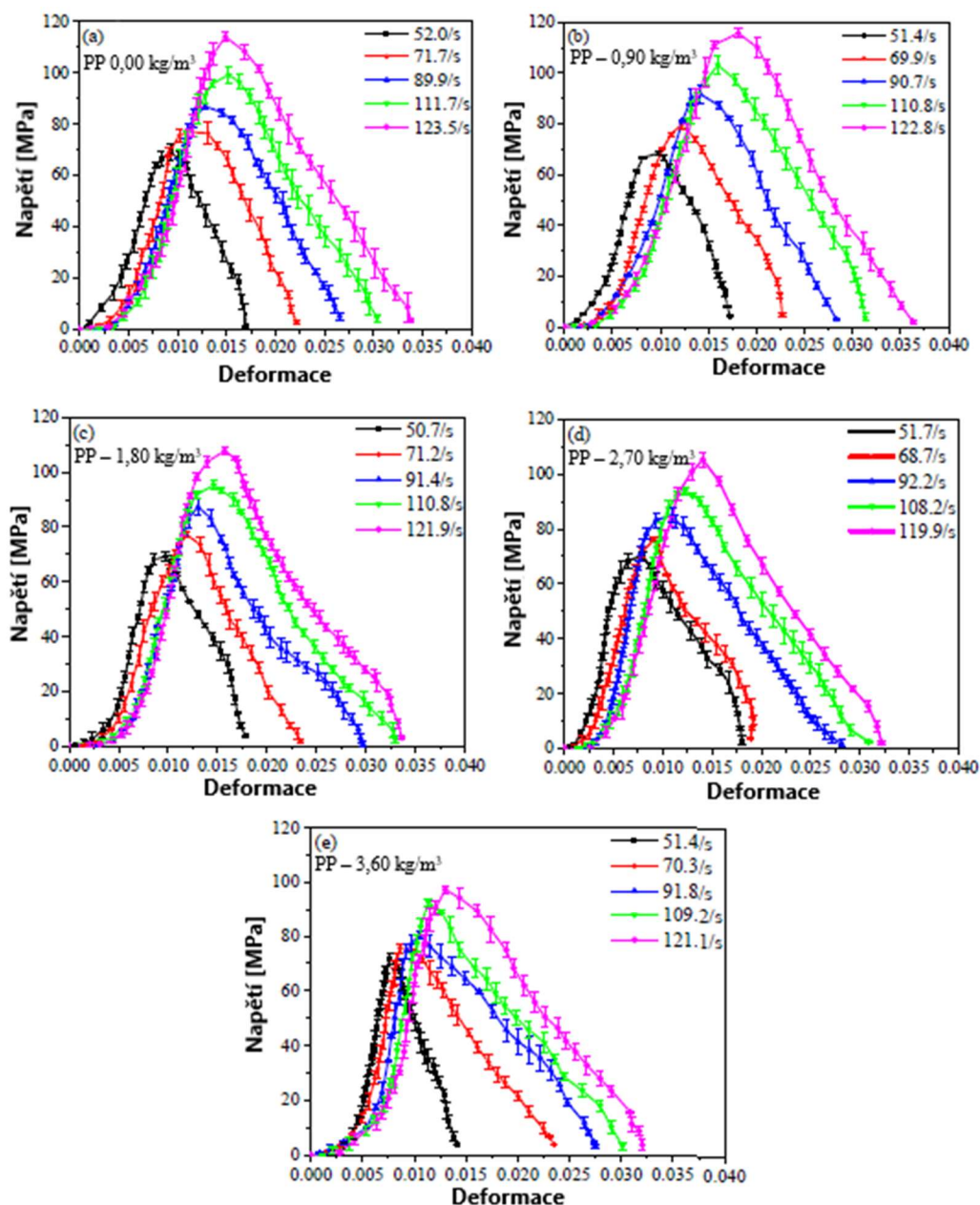


Zdroj: [97] Chen, Ch., Ren, Ch., Liu, Y., Yang, Y., Wang, E., Liang, X., (2019). *Effects of Polypropylene Fibre and Strain Rate on Dynamic Compressive Behaviour of Concrete.* (přeloženo)

Nejprve je vzorek umístěn mezi přijímací a převodní tyč, které jsou opatřeny tenzometry. Poté je uvolněn stlačený dusík a úderník o průměru 100 mm předá dopadový pulz přes

usměrňovač do přijímací tyče. Pulz je označován jako dopadová vlna. Jakmile vlna dorazí ke vzorku, začne se vzorek deformovat. Část pulzu se odrazí zpátky a část projde skrz vzorek do převodní a poté pohlcovací tyče. Celý proces je zaznamenávám počítačem, který sleduje změny hodnot napětí a deformace. Zvyšováním stlačení dusíku se zvyšuje rychlost deformace a výsledky se vynáší do grafu. Vrchol křivky poté znázorňuje napětí při deformaci. Graf č. 13 znázorňuje poměr napětí a deformace u vzorků při různých množstvích PP vláken v kompozitu za různých rychlostí deformace. [97]

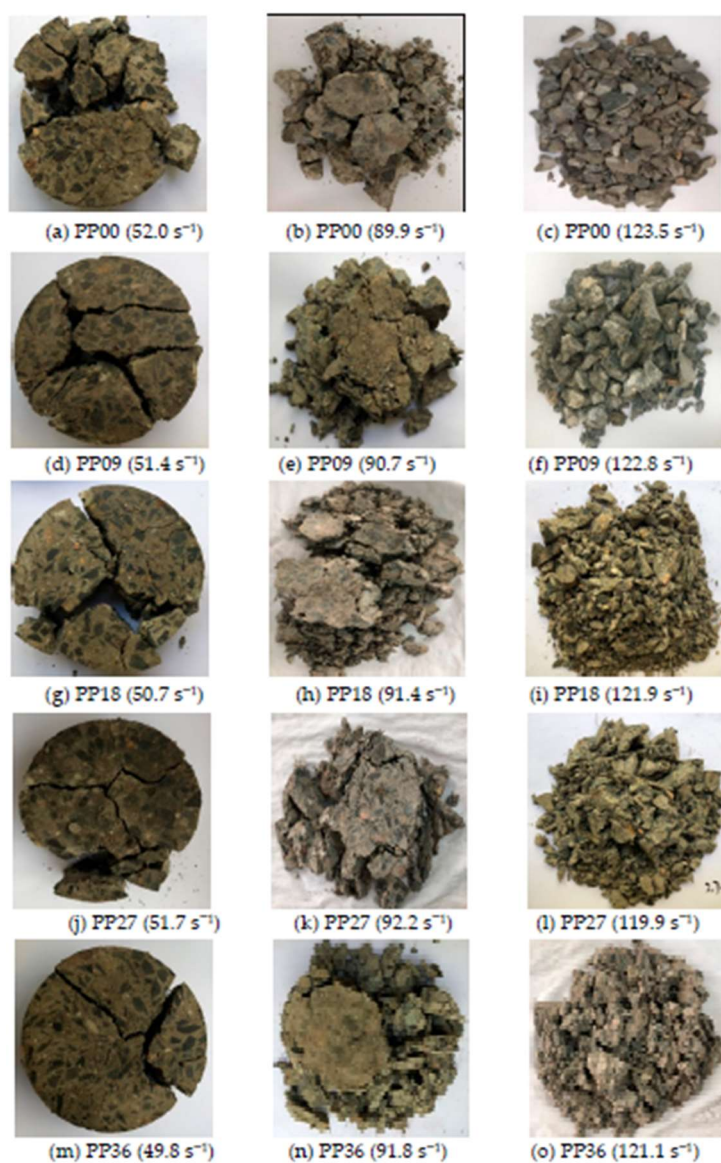
Graf 11: Efekt rychlosti deformace na vztah deformace a napětí



Zdroj: [97] Chen, Ch., Ren, Ch., Liu, Y., Yang, Y., Wang, E., Liang, X., (2019). Effects of Polypropylene Fibre and Strain Rate on Dynamic Compressive Behaviour of Concrete. (přeloženo)

Na sérii obrázků č. 28 je vidět, že při nižších rychlostech deformace jsou vlákna schopná kontrolovat rozvinutí prasklin. Se zvyšující se rychlostí však vlákna ztrácí svou účinnost, především kvůli extrémně malé době zatížení a rychlému nárůstu deformace. Také je na poškození vzorků zjevné, že s přibývajícím množstvím vláken se zlepšuje soudržnost vzorků po zatížení. Při nižší rychlosti deformace se na vzorcích vyskytuje malý počet prasklin, jejichž množství a velikost se zmenšuje s přibývajícím množstvím vláken. Při nejvyšší rychlosti deformace už ale téměř není rozdíl mezi vzorky s různým množstvím vláken, protože vzorky jsou téměř rozdrceny [97]

Obr. 27: Porušení vzorků s různým množstvím PP vláken při zvyšující se rychlosti deformace



Zdroj: [97] Chen, Ch., Ren, Ch., Liu, Y., Yang, Y., Wang, E., Liang, X., (2019). *Effects of Polypropylene Fibre and Strain Rate on Dynamic Compressive Behaviour of Concrete.* (přeloženo)

Jak již bylo řečeno, dynamická odolnost se zvyšuje s přibývajícím množstvím vláken, stejně tak se ale zhoršuje zpracovatelnost a klesá statická pevnost. Proto je nutné pro každé použití určit ideální dávku, která splní všechny požadavky. Jako nejvhodnější množství vláken autoři uvedli přidání $0,9 \text{ kg/m}^3$ betonu. Tato dávka vykazala největší zlepšení odolnosti proti nárazu v porovnání se zhoršením zpracovatelnosti a snížení pevnosti v tlaku. [97]

3.2.5 Použití PP vláken ve vysokohodnotném samozhutňujícím těžkém vláknobetonu (HPFRHW SCC)

Aslani a kol. se ve své práci zabývali možností využití PP vláken ve vysokohodnotném samozhutňujícím těžkém vláknobetonu (HPFRHWSCC – High Performance Fiber Reinforced Heavy Weight Self-Compacting Concrete). Porovnávali vliv přídatku 60 mm dlouhých ocelových vláken v množství 0.25, 0.5, 0.75 a 1 % s PP makrovlákny délky 65 mm v množství 0.10, 0.15, 0.20 a 0.25 %. Vytvořili a porovnávali dva druhy matrice. V první bylo kamenivo normální hmotnosti nahrazeno ze 75 % těžkým magnetitovým kamenivem a ve druhé těžké kamenivo nahradilo běžné kompletně ze 100 %. [98] Byla sledována konzistence zkouškou rozlitím a J-Ring. Na ztvrdlém betonu byla stanovena pevnost v tlaku, příčném tahu a ohybu. Přidání vláken a záměna kameniva za těžké měla dle očekávání nepříznivý dopad na zpracovatelnost těžkého betonu. Přesto, že byly tyto vlastnosti zhoršené, s výjimkou dvou vzorků všechny záměsi splnily podmínku rozlití alespoň o průměru 600 mm danou normou. Také čas rozlití T500 byl u všech záměsích v rozmezí 2,5-6 s podle množství vláken, což odpovídá doporučenému intervalu 2-5 s pro prostý SCC. [99] Zvyšující se dávka vláken jak ocelových, tak PP, by měla za následek výrazné zhoršení zpracovatelnosti. Proto byly do záměsích také zvyšovány dávky superplastifikačních přísad a jemných podílů. Tím bylo dosaženo dostatečné zpracovatelnosti a tekutosti pro splnění všech kritérií samozhutnitelného betonu. Zpracovatelnost také zhoršilo zvýšení magnetitového kameniva ze 75 % na 100 %. Toto kamenivo má vyšší nasákavost než křemičité kamenivo v referenční záměsi, což dále snižuje zpracovatelnost. [98]

Záměna běžného kameniva (NWA – Normal Weight Aggregate) za těžké (HWA – Heavy Weight Aggregate) měla za následek zvýšení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu. U záměsích se 75 % HWA a větším množstvím vláken nebylo dosaženo požadované hranice 2600 kg/m^3 , což je spodní hranice pro klasifikaci betonu jako těžkého. Toto je způsobeno

vyšším množstvím vzduchu vneseným PP vlákny a vyšší mezerovitostí způsobenou tuhými ocelovými vlákny. Zvýšení množství HWA na 100 % mírně zvýšilo objemovou hmotnost. Nárůst nebyl výrazný, stačil ale pro zařazení betonu do kategorie těžkých betonů. [98]

Záměna NWA za HWA měla za následek snížení pevnosti v tlaku. Jako příčiny jsou uvedeny vysoce krystalická křehká struktura magnetitu, jeho vysoká nasákavost a vysoká objemová hmotnost, která mohla způsobit mírnou segregaci kameniva. Vysoká nasákavost také zpozdila tvorbu C-S-H gelu. Díky přidavku jak ST, tak PP vláken ale výsledná pevnost v tlaku byla mírně vyšší než referenčního vzorku. Vláknem přemostila trhliny a mezery v betonu a zabránila rozvinutí sítě trhlin předcházející porušení tlakem. Pevnost v tlaku po 7 dnech byla u vzorků s vlákny přibližně o 15-20 % vyšší než u referenčního vzorku. Po 28 dnech zrání už však pevnost zkoušených vzorků byla průměrně o 1 % vyšší než referenční směs. [98]

Pevnost v příčném tahu klesla při zvýšení množství HWA, ale zvyšovala se s přibývajícím množstvím vláken. Přídavek ST vláken v množství větším než 0,75 % zvýšil pevnost v tahu, kdežto při nižším množství byla pevnost nižší než u referenčních vzorků. Množství tuhých ocelových vláken totiž nebylo dostatečné, aby překlenulo vzniklé mezery mezi hrubým kamenivem. Přídavek PP vláken zvýšil pevnost v tahu ve všech množstvích. Ohebná vlákna nejen překlenula vzniklé trhliny, navíc se ale mohla deformovat a vyplnit mezery, které ocelová vlákna kvůli své tuhosti nemohla vyplnit. PP vlákna v množství 0,25 % vykazala nejvyšší zlepšení mezi všemi vzorky jak u záměsi se 75 % HWA, tak i se 100 %. [98]

Obdobně jako pevnost v příčném tahu, stejně tak pevnost za ohybu je snížena zvýšením množství HWA. Pevnost za ohybu vyšší, než referenční vzorek vykazaly vzorky s vyšším množstvím ST i PP vláken. Jako překvapivý výsledek se ukázala vyšší pevnost za ohybu trámce s PP vlákny v záměsi se 100 % HWA v porovnání s nižším množstvím těžkého kameniva. Autoři jako možné vysvětlení uvádí vyšší mezerovitost a tím pádem více prostoru pro vyplnění PP vlákny, která zvýšila překlenutím trhlin pevnost za ohybu. [98]

Prvky konstrukcí se složitějším tvarem a požadavky na vysokou objemovou hmotnost nemohly být řešeny samozhutnitelným betonem, neboť při vyšší objemové hmotnosti kameniva hrozila segregace a další technologické problémy. Aslani a kol. představili řešení

tohoto problému. Jejich publikace ukazuje možnost využití těžkého SCC, což otevírá cestu pro velké množství využití v prostorově náročných konstrukcích s požadavky na hmotnost nebo na stínící schopnost. Díky vysoké účinnosti na tahové vlastnosti výsledného kompozitu, a především ohebnosti a možnosti deformace se PP vlákna ukázala jako vhodnější varianta než tuhá ocelová vlákna.

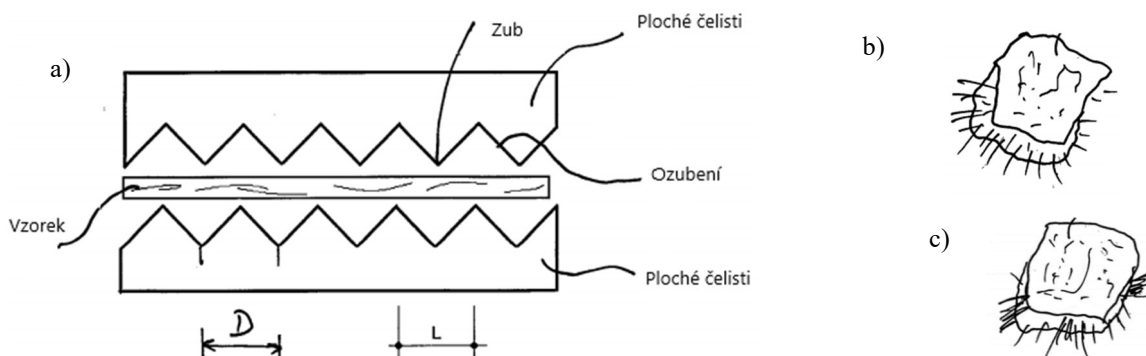
4 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘOVÁNÍ VLIVU PŘÍDAVKU POLYMERNÍCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI ČERSTVÝCH A ZATVRDLÝCH BETONŮ

V předchozích kapitolách byly představeny nejběžnější způsoby zkoušení vláknobetonu a uvedeny vlivy přídatku vláken na čerstvý a zatvrdlý beton. S využitím těchto znalostí je v následující kapitole navržen postup zkoušení záměsi vláknobetonu v porovnání s referenčním betonem bez vláken. Postup je popsán obecně a může být využit pro zkoušení libovolné záměsi s širokou škálou vláken.

Nejprve je nutno ověřit základní podmínku kvalitního vláknobetonu. Tou je homogenní rozptýlení vláknité výztuže. Postup pro ověření množství vláken ve vzorku dle normy ČSN EN 14721 + A1, který navrhuje podrtit vzorek vláknobetonu a ručně vybrat a zvážit vlákna je velmi pracný a pro polymerní mikroválka prakticky neproveditelný. Proto je navrženo užití postupu patentovaného pod číslem 305770 *Zařízení pro přípravu vzorků pro posouzení rozptýlení vláknité polypropylenové výztuže v cementových kompozitech a způsob přípravy vzorků na tomto zařízení*. [102]

Princip této zkoušky spočívá v odebrání čerstvého vláknobetonu a vytvoření ideálně čtvercové desky o tloušťce do 25 mm. Ta je po zatvrdnutí umístěna do lisu se speciálními čelistmi znázorněnými na obrázku č. 29. Protilehlé zuby jsou vzájemně posunuty o polovinu délky, a tak zajistí nalámání desky na uniformní pásy. Ty jsou poté otočeny o 90 ° a znovu nalámány. Vzniknou tak čtverce téměř shodných rozměrů. Čelisti by měly být dimenzovány tak, aby výsledný čtverec měl délku hrany kratší, než je délka přidávaného vlákna. Touto podmínkou je zajištěno přesahování vláken přes hranu čtverce. Poté se pozorováním snadno určí, zda vlákna trčí ze vzorků rovnoměrně, nebo tvoří shluky v určitých místech. [102]

Obr. 28: Schéma zkušebního zařízení dle patentu 305770 a vzorků po zkoušení s b) homogenním rozdělením vláken, c) s vlákny ve shlucích



Zdroj: [102] Kopkáně, D., Bodnárová, L., Hela, R., Herka, P., Štáhel, P., (2016). Patent č. 305770

Čerstvý vláknobeton budeme dále testovat zkouškou rozlití dle normy ČSN EN 12350–5. Její provedení je podrobněji popsáno v kapitole 2.3.1 Zkoušení čerstvého betonu. [78] Přidáním vláken do betonové směsi očekáváme zhoršení zpracovatelnosti alespoň o jednu třídu.

V kombinaci zkoušky rozmísení vláken dle zmíněného patentu a s porovnáním zhoršení zpracovatelnosti s hodnotou, kterou udává výrobce pro stanovené množství vláken, získáme poměrně odpovídající představu o množství a rozmísení vláken v čerstvém vláknobetonu.

Vlastnosti čerstvého vláknobetonu také hodnotí zkouška zhutnitelnosti betonu. Provádíme ji dle normy ČSN EN 12350-4 doplněné o ustanovení týkající se vláknobetonu uvedené v ČSN P 73 2451. [79] [80] Jako u předchozí zkoušky přídavek vláken může negativně ovlivnit zhutnitelnost čerstvého betonu. Stejně jako u zkoušky rozlitím, i zde výrobci ve svých technických listech uvádí zhoršení zhutnitelnosti přidáním určitého množství vláken. Tato zkouška tedy také může napovědět, zda bylo přidáno správné množství vláken.

Posledním krokem je zjištění množství vzduchu v čerstvém vláknobetonu (dle ČSN EN 12350-7) [81] a objemová hmotnost vláknobetonu (dle ČSN EN 12350-6). [82] Kroky těchto zkoušek můžeme s výhodou kombinovat. Cejchovanou tlakovou nádobu o známém objemu můžeme využít pro výpočet objemové hmotnosti a poté čerstvý beton zhutnit a dál pokračovat se zkouškou obsahu vzduchu. Přidáním polymerních vláken neočekáváme výraznou změnu objemové hmotnosti, musíme však počítat s nárustem množství vzduchu až o 2 %.

Pokud žádná ze zkoušek nevykáže žádné nezvyklé hodnoty, které by už na začátku zkoušení ukázaly špatný návrh záměsi, můžeme čerstvou směs použít pro výrobu zkušebních těles. Pro navržené zkoušení jsou požadovány vzorky tvaru krychle o hraně délky 150 mm a trámce délky 700 mm o šířce a výšce 150 mm. Pokud by byl požadavek na válcovou pevnost, je nutné vyrobiť také válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Bude vytvořeno takové množství vzorků, které odpovídá normovému požadavku u všech plánovaných zkoušek. Toto množství bude poté zdvojnásobeno, pro možnost zkoušení po 7 i po 28 dnech. Znalost jak 7denních, tak i 28denních vlastností může přinést informaci například o rozdílném časovém průběhu nárustu vlastností mezi prostým betonem a vláknobetonem.

Vzorky budou odformovány cca po 24 hodinách a po stanovenou dobu 7 a 28 dní ponechány v laboratorních podmínkách o definované teplotě a vlhkosti vzduchu nebo ve vodním uložení. Nejprve bude provedeno nedestruktivní zkoušení a poté budou stejné vzorky použity pro destruktivní zkoušky. Následující zkoušky budou prováděny jak po 7 dnech, tak po 28 dnech od vytvoření čerstvé směsi.

Na krychlích bude pomocí ultrazvukové impulzové metody zjištěna informativní pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu. [83] Jak je několikrát zmiňováno v kapitole 3, přidání vláken může mít za následek snížení pevnosti v tlaku. Druh a množství vláken ovlivní míru snížení pevnosti. Přídavkem vláken očekáváme nárůst modulu pružnosti především v prvních dnech po výrobě vzorků. Po 28 dnech se hodnota modulu pružnosti může srovnat s hodnotou naměřenou na referenčním vzorku bez vláken. Dynamický modul pružnosti v tlaku i v tahu bude zkoušen nedestruktivní rezonanční metodou. Bude použito jak podélné, tak příčné vlnění a měla by být splněna podmínka maximálního rozdílu 10 % mezi výsledky těchto dvou způsobů. Poté bude pomocí kroutivého vlnění zjištěn dynamický modul pružnosti ve smyku. [22]

U všech zkoušených prvků bude stanovena objemová hmotnost, která by se u jednotlivých vzorků neměla lišit o více jak 10 %. Tato bude ověřena dle normy ČSN EN 12390-7. [105]

Na krychlích bude provedena zkouška pevnosti v tlaku (dle EN 12390-3) [85], která by měla potvrdit nebo upřesnit dříve získanou informativní pevnost v tlaku. Očekáváme, že se bude opakovat trend snížení pevnosti v tlaku s rostoucím množstvím vláken.

Pevnost v příčném tahu je další zkouškou, která bude provedena na krychlích. Bude prováděna dle ČSN EN 12390–6. [87] Na rozdíl od pevnosti v tlaku, zde očekáváme nárůst pevnosti oproti referenčnímu vzorku. O kolik může daný druh vláken zlepšit tuto pevnost zmiňuje kapitola 3.1.3.

První zkouškou provedenou na trámcích bude statický modul pružnosti v tlaku. Postup zkoušky a ukázka osazení trámce v lisu je zmíněna v kapitole 2. [22] Není očekáváno, že by přidavek vláken výrazně ovlivnil tento modul pružnosti, ať už kladně nebo záporně. Trámce budou dál zkoušeny čtyřbodovým ohybem pro zjištění pevnosti v tahu ohybem v bodě vzniku makrotrhliny, při průhybu 0,5 mm a pro zjištění zbytkové pevnosti v tahu ohybem při průhybu 3,5 mm. Reziduální pevnost v tahu ohybem naměříme pouze na trámcích s vlákny, neočekáváme, že by referenční vzorek vykázal pevnost po otevření makrotrhliny. Zkoušky budou prováděny dle EN 12390-5 s úpravou některých parametrů pro zkoušení vláknobetonu dle ČSN P 73 2452. [89] [106]

Při zkoušení statického modulu pružnosti v tahu dle ČSN 73 6174, využijeme naměřenou pevnost v tahu ohybem. Při postupném zatěžování trámce je síla zvyšována po 10 % předpokládané pevnosti v tahu ohybem. Oproti výsledkům na referenčním vzorku můžeme očekávat mírné zlepšení výsledků v závislosti na množství přidávaných vláken. [88]

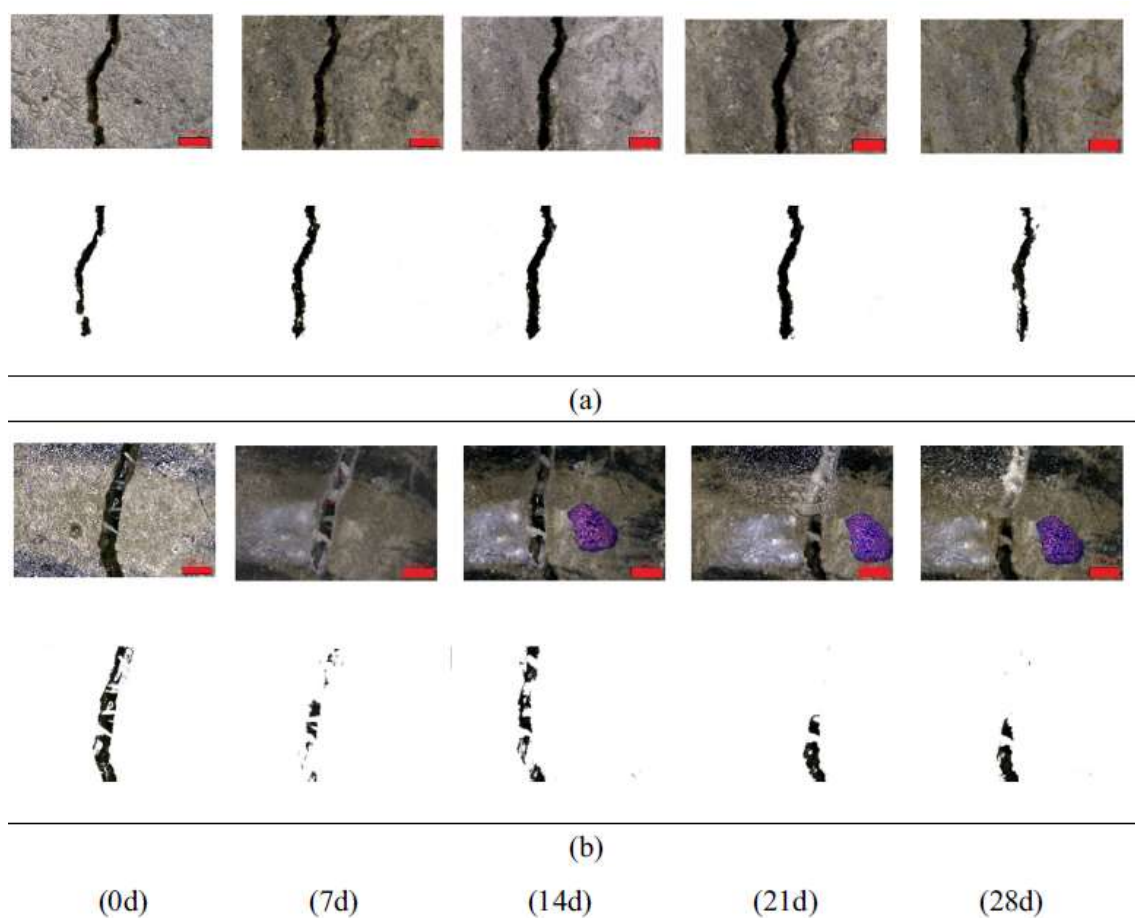
Podle požadavků na použití vláknobetonu v konstrukci může být sestava zkoušek doplněna o zkoušku průsaku vody, ohrusnosti či odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám. Ta by byla pro vláknobeton prováděna dle normy platné i pro prostý beton. Jedná se o normu ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. [107]

Pokud by byl požadavek na zatížení vláknobetonu dynamickým namáháním, je možno využít SHPB zařízení (viz. kapitola xxx). [97] Pro tuto zkoušku je ale nutno při výrobě vzorků myslet na potřebu válcových vzorků o průměru shodném s průměrem trubice zařízení. Běžný rozměr je průměr 100 mm. Jedná se ale o poměrně nový druh zkoušení, proto dle dostupnosti může být trubice jiného průměru.

Trámce porušené makrotrhlinou po zatěžování v tahu ohybem můžeme dále pozorovat pro určení vlivu polymerních vláken na samohojení vláken. Jedním z nejjednodušších postupů

vedle vlastního měření šířky trhliny je vyfocení snímků vzorků stereo mikroskopem a převedení obrazu trhliny do binární podoby. Pro lepší porovnání je navrženo, přidání bakterií zmiňovaných v kapitole 3.2.2. do některých trámců v záměsi. Tyto bakterie nijak neovlivní žádné jiné vlastnosti vzorků, proto je můžeme bezpečně porovnávat s ostatními vzorky. Příklad výsledku pozorování trhlin na referenčním vzorku a vzorku s přidáním polymerními vlákny v kombinaci s bakteriemi je znázorněn na obrázku č 30.

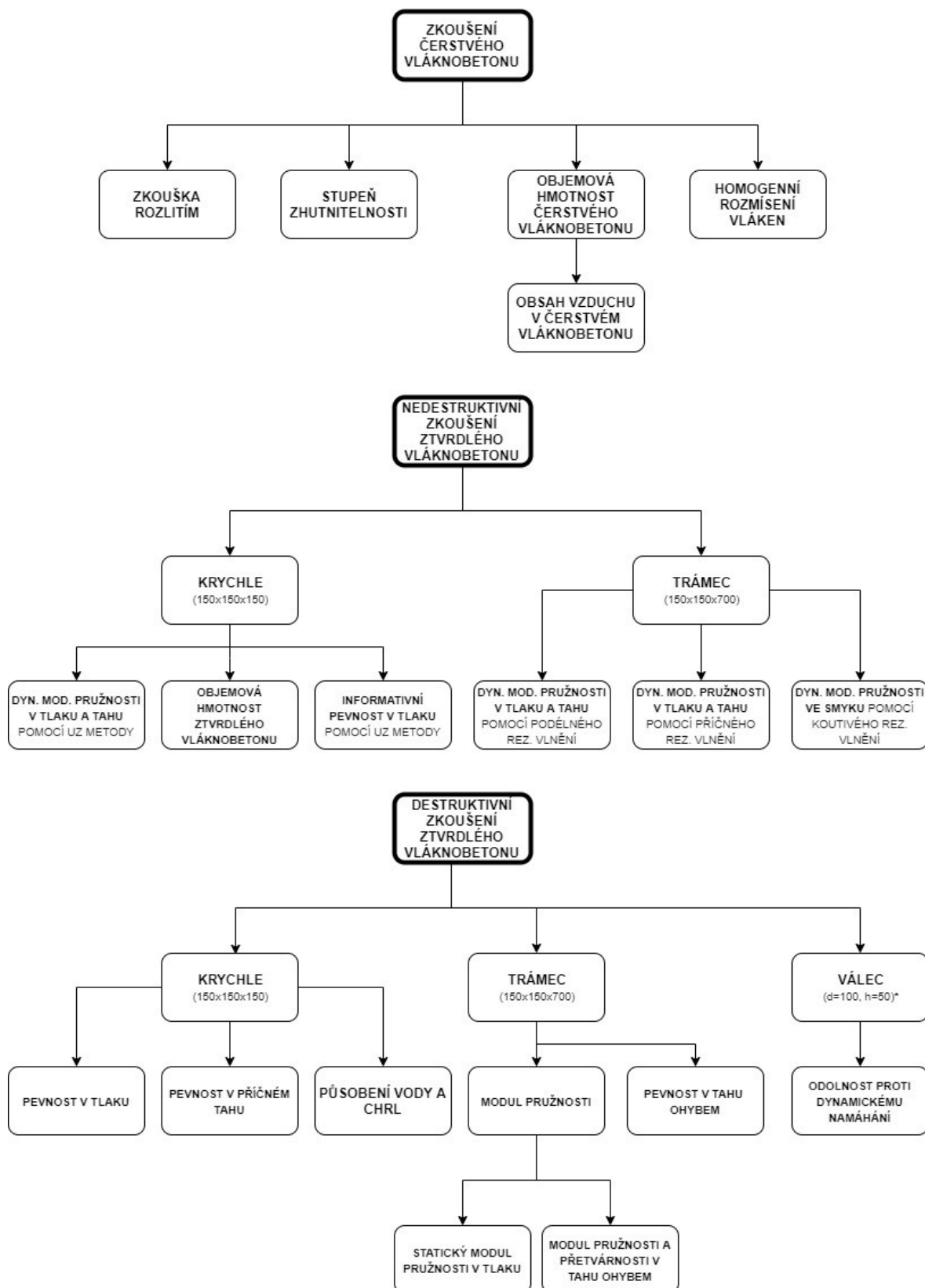
Obr. 29: Povrch a binární obraz trhlin po různých časech hojení na a) referenčním vzorku b) betonu s PP vlákny a bakteriemi



Zdroj: [92] Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete.

Takto navržený sled zkoušek je pro názornost zpracován do diagramu na obrázku č. 31.

Obr. 30: Schéma návrhu zkoušení vláknobetonu



ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracovat a uvést vliv přídavku polymerních vláken na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých cementových kompozitů. Nejprve byla věnována pozornost samotným polymerním vláknům. Byly představeny nejpoužívanější tvary a druhy vláken, stejně jako materiály pro jejich výrobu. Představeny byly také způsoby jejich výroby se zaměřením na zvlákňování tavné, suché a mokré a také elektrostatické zvlákňování polymerních vláken. Vlákná nejčastěji používaná pro konstrukční účely jsou vyráběna tavným zvlákňováním. Patří mezi ně PP, PE, PVA, PES a PA vlákna. Byly uvedeny vlastnosti těchto vláken a také normou stanovené požadavky na jejich vlastnosti. Pro srovnání byly poté vlákna různých materiálů porovnána v přehledné tabulce.

Přidáním polymerních vláken do prostého betonu vznikne kompozitní materiál označovaný jako vláknobeton. Přidáním další složky do matrice prostého betonu se ale výrazně změní některé její vlastnosti. Historií, výrobou a zkoušením vláknobetonu se zabývá druhá kapitola. Představuje vláknobeton jako stovky let starý materiál, který se začal poprvé objevovat jako výrobky z hlíny vyztužené slámou. Vláknobeton, ve smyslu moderního stavebního materiálu se ale začal rozvíjet až ke konci devatenáctého století. Dále jsou uvedeny složky čerstvého vláknobetonu, které se od prostého betonu příliš neliší. I když se složení čerstvého betonu kromě přídavku vláken výrazně nemění, jeho vlastnosti se mění značně. Jsou proto uvedeny základní zkoušky ověřující tyto vlastnosti. Vlákná v betonu mají za následek nutnost upravení postupu některých zkoušek v porovnání s normovým postupem pro prostý beton. Jsou proto uvedeny jak normy pro zkoušení vlastností prostého betonu, tak i normy, které tyto postupy upravují pro zkoušení vláknobetonu. Mimo jiné jsou uvedeny příklady využití polymerních vláken v konkrétních konstrukcích.

První část třetí kapitoly podrobně rozebírá vliv přídavku PP, PE a PVA mikro a makrovláken na vlastnosti čerstvého betonu. Vlákná v betonu výrazně zlepšují některé vlastnosti, jako je pevnost v příčném tahu, pevnost v tahu ohybem, tažnost a další vlastnosti spojené s přetvářením betonu. Na druhou stranu ale vlákna například zhoršují zpracovatelnost, snižují pevnost v tlaku a zvyšují množství vzduchu v betonu. Pro všechny druhy vláken jsou pro lepší orientaci při hledání optimálního množství vláken do záměsi

udávána procentuální zlepšení nebo zhoršení vlastností v závislosti na množství přidaných vláken.

Druhá část kapitoly se zabývá využitím vláknobetonů ve specifitějších podmínkách. Je zmíněn pozitivní dopad přídavku polymerních vláken na odolnost proti vysokým teplotám a omezení explozivního oprýskání betonu či vliv vláken pro zlepšení odolnosti proti dynamickému zatížení při nižší rychlosti deformace. Dle zmíněného výzkumu bylo dokázáno, že ani přídavek vláken příliš nezvýší odolnost proti dynamickému namáhání při velmi vysoké rychlosti deformace. Je blíže popsán princip samohojení (self-healing) betonu za pomoci bakterií a jak je tato schopnost ovlivněna přídavkem vláken. Vlákná zlepšují vlastnosti vzorků po samohojení a omezují nutné množství bakterií, které tudíž neprodukují tolik škodlivých dusičnanů. Proces samohojení betonu se tak stává ekologičtější, což je v posledních letech velká výhoda. Dále je představeno využití kontinuálních polymerních vláken v betonových prefabrikátech a jak zlepšují tahové vlastnosti daných prvků. Jako poslední ne úplně běžný způsob užití vláken je přidání do těžkého samozhutnitelného betonu. Zde pomáhají udržet soudržnost betonu, zlepšují jeho tahové vlastnosti a zabraňují sedimentaci těžkých zrn kameniva.

S využitím informací v předchozích kapitolách byl v poslední části práce navržen postup experimentálního zkoušení vláknobetonu v porovnání s referenčními vzorky prostého betonu. Byl navržen sled zkoušek a zmíněny očekávané výsledky porovnání zkoušeného vláknobetonu s prostým betonem. Pro ověření rozmísení polymerních vláken v betonu je navrženo využití patentu vlastněného mezi jinými i VUT místo normového postupu, který pro polymerní vlákna není příliš vhodný.

Závěrem můžeme shrnout, že přídavek polymerních vláken v betonu má mnohé výhody a otevírá betonu cesty tam, kde by prostý beton nemohl uspět. Musí se ale počítat také se zápornými vlivy, a proto je pro každé použití potřeba najít ideální množství a materiál vláken, který zajistí co nejvýraznější zlepšení požadovaných vlastností s co nejnižším dopadem na vlastnosti ostatní.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VACL, J., *Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti*. Zlín, 2012. [bakalářská práce]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická
- [2] BODNÁROVÁ, L., (2010). *Kompozitní materiály (CJ0,2). Studijní opora*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST
- [3] TUL, Fakulta textilní, (2015). *Textilní vlákna, přednáška 4*. [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/29283369/prednaska-04>
- [4] MILITKÝ, J., (2002). *Textilní vlákna, Klasická a speciální*. Liberec: TUL, fakulta textilní. 231 s. ISBN 80-7083-644-X
- [5] PAKOSTOVÁ, V., (2017). *Textilní vlákna*. [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2017/C5985/um/Textilni_vlakna-text_k_prednasce.pdf
- [6] Oxolutia, (2014). *Electrospinning*. [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.oxolutia.com/technology/electrospinning/>
- [7] ČSN EN 14889-2, Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007, 19 s.
- [8] Bon, (2015). *32-504 Nylon Concrete Fibers*. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.bontool.com/img/product/description/TB32504.pdf>
- [9] Pirapi, (2020). *Vlákna FIBRE PE*. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.pirapi.cz/vyztuze/vlakna-fibre-pe>
- [10] Škola textilu, (2020). *Polyetylenová vlákna*. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/elearning/468/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Polyetylenova-vlakna.html>
- [11] Chinafiber, (2020). *PVA High Strength & Modulus Fiber*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.chinafiber.com/export/pvah.html>
- [12] Wikipedia, (2020). *Polyvinylalkoholová vlákna*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyvinylalkoholová_vlákna
- [13] HLOBILOVÁ, K., (2019). *Metody identifikace textilních materiálů se zaměřením na metodu FTIR-ATR*. [Bakalářská práce]. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická.

- [14] BASF, (2020). *MasterFiber 401, technický list*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://assets.master-builders-solutions.basf.com/cs-cz/basf-masterfiber-401-tl.pdf?_hstc=829422.cc07ad596324bf0befcd125e6393f573.1589386974027.1589386974027.1&_hssc=829422.1.1589386974028&_hsfp=35901472
- [15] BOTAI, (2020). *PP Fiber Monofilament Form 18mm*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.botaitech.com/concrete-fiber/polypropylene-fiber/pp-fiber-monofilament-form-18mm.html>
- [16] Tagroup, (2020). *Forta-Ferro, Strong as steel*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: http://www.tagroup.com.lb/uploads/downloads/ferrobrochure_1.pdf
- [17] Forta-ferro, (2020). *Forta ECONO-NET*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.forta-ferro.com/products/econo-net/>
- [18] Forta-ferro, (2020). *Forta ECONO-MONO*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.forta-ferro.com/products/econo-mono/>
- [19] Sklocement Beneš, (2020). *BeneSteel 55*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://sklocement.cz/polymerova-vlakna-benesteel/>
- [20] Premix servis, (2020). *FIBRREX*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.premixservis.cz/w/eshop-templates/premixservis/files/tl_fibrrex.pdf
- [21] Chryso, (2020). *Fibrin 1950 D*. [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.chryso.cz/p/7522/3/2680/cz>
- [22] MICHNIAK, R., (2013). *Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony*. [Diplomová práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [23] NAAMAN, A., E., (2018). *FIBER REINFORCED CONCRETE: FIVE DECADES OF PROGRESS*. 4th Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro. 22 s. <https://doi.org/10.21452/bccm4.2018.02.01>
- [24] HELA, R., (2007). *Technologie betonu II, Modul M 01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST
- [25] MAHASNEH, B., Z., (2005). *The Effect of Addition of Fiber Reinforcement on Fire Resistant Composite Concrete Material*. Journal of Applied Sciences, 5: 373-379. DOI: 10.3923/jas.2005.373.379. [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2005.373.379>

- [26] BARTOŠ, P. JM., (2012). Vláknobeton. *Betonové konstrukce 21. století – betony s přidanou hodnotou. BETON TKS*, roč. 12, č. 7, s. 69-77. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-7-68.pdf>
- [27] E15. (2020). *Aplikace vláknobetonu*. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/magazin/aplikace-vlaknobetonu-976296>
- [28] VODIČKA, J., VESELÝ, V., BROUKALOVÁ, I., LOREK, K., (2010). Plovoucí ostrůvek. *BETON TKS*, roč. 10, č. 2, s. 22-25. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-22_0.pdf
- [29] Harshil, P., (2018). Utilization of polymer fiber reinforced concrete pavement. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/HARSHILPATEL47/utilization-of-polymer-fiber-reinforced-concrete-pavement-89166480>
- [30] KREJČÍK, J., (2017). Problematika odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot. [Bakalářská práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST. 68 s.
- [31] PAKRAVAN, H. R., OZBAKKALOGLU, T., (2019). Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. *Construction and Building Materials*, č. 207, s. 491-518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078>.
- [32] YAP, S. P., ALENGARAM, U.J., JUMAAT, M.Z., (2013). Enhancement of mechanical properties in polypropylene and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete. *Mater. Des.* č. 49, s. 1034-1041. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.070>.
- [33] MAZZOLI. A., MONOSI, S., PLESCIA, E.S., (2015). Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials*, č. 101, s. 596-601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090>.
- [34] MAZAHERIPOUR, H., GHANBARPOUR, S., MIRMORADI S.H., HOSSEINPOUR I., (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, č. 25, s. 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018>.
- [35] RAMEZANIANPOUR, A.A., ESMAEILI, M., GHAHARI, S.A., NAJAFI M.H., (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers.

- Construction and Building Materials*, č. 44, s. 411-418.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076>.
- [36] LEE, G., HAN, D., HAN, M.C., HAN, C.G., SON, H.J., (2012). Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, č. 34, s. 313-320, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.015>.
- [37] GENCEL, O., OZEL, C., BROSTOW, W., MARTÍNEZ-BARRERA, G., (2011). Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibers. *Mater. Res. Innov*, č. 15, s. 216-225, <https://doi.org/10.1179/143307511X13018917925900>.
- [38] WONGTANAKITCHAROEN, T., NAAMAN, A.E., (2007). Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. *Mater. Struct*, č. 40, s. 289–300, <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9106-z>.
- [39] SIVAKUMAR, A., SANTHANAM, M., (2007). A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos*, č. 29, s. 575–581, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005>.
- [40] ALY, T., SANJAYAN, J.G., COLLINS, F., (2008). Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Mater. Struct*, č. 41, s. 1741–1753.
- [41] SAJE, D., BANDELJ, B., ŠUŠTERŠIČ, J., LOPATIČ, J., SAJE, F., (2011). Shrinkage of polypropylene fiber-reinforced high-performance concrete. *J. Mater. Civ. Eng*, č. 23 s. 941–952, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000258](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000258).
- [42] PESIC, N., ZIVANOVIC, S., GARCIA, R., PAPASTERGIOU, P., (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibers. *Construction and Building Materials*, č. 115 s. 362–370, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050>.
- [43] JUAREZ, C.A., FAJARDO, G., MONROY S., DURAN-HERRERA, A., VALDEZ, P., MAGNIONT, C., (2015). Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. *Construction and Building Materials*, č. 91, s. 164–170, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.028>.
- [44] PASSUELLO, A., MORICONI, G., SHAH, S.P., (2009). Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Construction and*

Building Materials, č. 31, s. 699–704,
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.004>.

- [45] SOE, K.T., ZHANG, Y.X., ZHANG, L.C., (2013). Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. *Compos. Struct.*, č. 104, s. 320–330, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.029>.
- [46] PAN, Z., WU, C., LIU, J., WANG, W., LIU, J., (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, č. 78, s. 397–404, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.071>.
- [47] YUN, H.D., KIM, S.W., LEE, Y.O., ROKUGO, K., (2011). Tensile behavior of synthetic fiberreinforced strain-hardening cement-based composite (SHCC) after freezing and thawing exposure. *Cold Reg. Sci. Technol.*, č. 67, s. 49–57, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.02.002>.
- [48] CHOI, J. IL., SONG, K. IL., SONG J.K., LEE B.Y., (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites. *Compos. Struct.*, č. 138, s. 116–121, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.046>.
- [49] PANTELIDES, C.P., GARFIELD, T.T., RICHINS, W.D., LARSON, T.K., BLAKELEY, J.E., (2014). Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests. *Eng. Struct.*, č.76, s. 24–33, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.040>.
- [50] NILI, M., AFROUGHSABET, V., (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, č. 24, s. 927–933, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.025>.
- [51] GRDIC, Z.J., CURCIC, G.A.T., RISTIC, N.S., DESPOTOVIC, I.M., (2012). Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, č. 27, s. 305–312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.044>.
- [52] LANZONI, L., NOBILI, A., TARANTINO, A.M., (2012). Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures. *Construction and Building Materials*, č. 28, s. 798–806, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.017>.

- [53] SIVAKUMAR, A., SANTHANAM, M., (2007). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibers. *Cem. Concr. Compos.*, č. 29, s. 603–608, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.006>.
- [54] ALBERTI, M.G., ENFEDAQUE, A., GÁLVEZ, J.C., (2014). On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, č. 55, s. 274–288, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>.
- [55] HAN, T., LIN, W., CHENG, A., HUANG, R., HUANG, C., (2012). Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume. *Mater. Des.*, č. 37, s. 569–576, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.038>.
- [56] AFROUGHSABET, V., OZBAKKALOGLU, T., (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, č. 94, s. 73–82, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>.
- [57] SUN, Z., XU, Q., (2009). Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Mater. Sci. Eng.*, č. 527, s. 198–204, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.056>.
- [58] NILI, M., AZARIOON, A., DANESH, A., DEIHIMI, A., (2016). Experimental study and modeling of fiber volume effects on frost resistance of fiber reinforced concrete, *Int. J. Civ. Eng.*, <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0122-2>.
- [59] ZHANG, P., LI, Q., ZHANG, H., (2011). Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash. *J. Reinf. Plast. Compos.*, č. 30, s. 1349–1358, <https://doi.org/10.1177/0731684411425974>.
- [60] SIMÕES, T., COSTA, H., DIAS-DA-COSTA, D., JÚLIO, E., (2017). Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes. *Construction and Building Materials*, č. 137, s. 548–556, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.104>.
- [61] BING, C., ZHEN, W., NING, L., (2012). Experimental research on properties of highstrength foamed concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, č. 24, s. 113–118, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000353).

- [62] BEHFARNIA, K., BEHRAVAN, A., (2014). Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels. *Mater. Des.*, č. 55, s. 274–279, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.075>.
- [63] MEDINA, N.F., BARLUENGA, G., HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., (2014). Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers. *Compos. PART B*, č. 61, s. 214–221, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.052>.
- [64] ZHANG, P., LI, Q.F., (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Compos. Part B Eng.*, č. 45, s. 1587–1594, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.006>.
- [65] ÇAVDAR, A., (2014). Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Compos. Part B Eng.*, č. 58, s. 463–472, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.013>.
- [66] SAID, S.H., RAZAK, H.A., (2015). The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC). *Mater. Des.*, č. 86, s. 447–457, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.125>.
- [67] SIRIJAROONCHAI, K., EL-TAWIL, S., PARRA-MONTESINOS, G., (2010). Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading. *Cem. Concr. Compos.*, č. 32, s. 62–72, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.003>.
- [68] CHOI, J., ZI G., HINO, S., YAMAGUCHI, K., KIM, S., (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, č. 69, s. 381–389, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.074>.
- [69] FALLAH, S., NEMATZADEH, M., (2017). Mechanical properties and durability of highstrength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, č. 132, s. 170–187, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>.
- [70] NOUSHINI, A., SAMALI, B., VESSALAS, K., (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, č. 49, s. 374–383, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035>.

- [71] ATAHAN, H.N., PEKMEZCI, B.Y., TUNCEL, E.Y., (2013). Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects. *J. Mater. Civ. Eng.*, č. 25, s. 1438–1445, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000691](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000691).
- [72] BOLAT, H., ŞİMŞEK, O., ÇULLU, M., DURMUŞ, G., CAN, Ö., (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Compos. Part B Eng.*, č. 61, s. 191–198, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>.
- [73] HEDONG, L.I., SHILANG, X.U., LEUNG, C.K.Y., (2009). Tensile and flexural properties of ultra high toughness cementitious composite. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.*, č. 24, s. 677–683, <https://doi.org/10.1007/s11595-009-4677-5>.
- [74] PEYVANDI, A., SOROUSIAN, P., JAHANGIRNEJAD, S., (2013). Enhancement of the structural efficiency and performance of concrete pipes through fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, č. 45, s. 36–44, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.084>.
- [75] ÇAVDAR, A., (2012). A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites. *Compos. Part B Eng.*, č. 43, s. 2452–2463, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.005>.
- [76] ALHOZAIMY, A.M., SHANNAG, M.J., (2009). Performance of concretes reinforced with recycled plastic fibers. *Mag. Concr. Res.*, s. 293–298, <https://doi.org/10.1680/macr.2008.00053>.
- [77] ČSN P 73 2450, (2015). Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 26 s.
- [78] ČSN EN 12350–5, (2009). Zkouška čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [79] ČSN EN 12350–4, (2009). Zkouška čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Praha: Český normalizační institut, 8 s.
- [80] ČSN P 73 2451, (2015). Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [81] ČSN EN 12350–7, (2009). Zkouška čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [82] ČSN EN 12350–6, (2009). Zkouška čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Český normalizační institut, 12 s.

- [83] CIKRLE, P., ANTON, O., DANĚK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P., (2010). *NDT zkoušení ve stavebnictví: Příručka ČŽV*. Brno: VUT v Brně, 95 s. ISBN 978-80-214-4198-9.
- [84] ČSN 731371, (2011). *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [85] ČSN EN 12390–3, (2009). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 20 s.
- [86] ČSN ISO 1920-10, (2016). *Zkoušení betonu–Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*, Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [87] ČSN EN 12390–6, (2010). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [88] ČSN 73 6174, (1994). *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: Český normalizační institut, 8 s.
- [89] ČSN P 73 2452, (2015). *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Český normalizační institut, 21 s.
- [90] WANG, J.Y., SOENS, H., VERSTRAETE, W., DE BELIE, N., (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, *Cem. Concr. Res.*, č. 56, s. 139–152. ISSN 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
- [91] QIAN, C., CHEN, H., REN, L., LUO, M., (2015). Self-healing of early age cracks in cementbased materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism, *Front. Microbiol.*, č. 6, s. 1225. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01225.
- [92] FENG, J., SU, Y., QIAN, CH., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, č. 228, s. 116810-116828, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116810>.
- [93] MIRJAFARI, P., ASGHARI, K., MAHINPEY, N., (2007). Investigating the application of enzyme carbonic anhydrase for CO sequestration purposes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, č. 46, s. 921–926. <https://doi.org/10.1021/ie060287u>.
- [94] JONKERS, H., THIJSEN, A., MUYZER, G., COPUROGLU, O., SCHLANGEN E., (2008). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Proceedings of 1st international conference on biogeo civil engineering*. Delft, The Netherlands. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.

- [95] MOBASHER, B., DEY, V., BAUCHMOYER, J., MEHERE, H., SCHAEF, S., (2019). Reinforcing Eciency of Micro and Macro Continuous Polypropylene Fibers in Cementitious Composites. *Applied sciences*. roč. ???, č. 9, 18 s. doi:10.3390/app9112189.
- [96] BASF–Master Builders Solutions. (2019). *Technical Document, MasterFiber MAC 2200CB Synthetic Macrofiber with Chemical Bond for Low Deflection Applications*. [online]. [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: <https://assets.master-builders-solutions.basf.com/en-us/basf-masterfiber-mac-2200-cb-tds.pdf>.
- [97] CHEN, CH., REN, CH., LIU, Y., YANG, Y., WANG, E., LIANG, X., (2019). Effects of Polypropylene Fibre and Strain Rate on Dynamic Compressive Behaviour of Concrete. *Materials*. 18 s., DOI: 10.3390/ma12111797.
- [98] ASLANI, F., HAMIDI, F., VALIZADEH, A., THANH-NAHN DANG, A., (2020). High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, č. 232, s. 117230-117244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117230>.
- [99] ERMCO. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete (May).
- [100] BUCHLÁK, J., MATĚJKA, J., RYJÁČEK, P., BÍLÝ, P., PROCHÁZKA, J., POLLERT, J., FABEL, J., (2020). Experimentální ověření funkčnosti ponorného mola z vláknobetonu. *BETON TKS*, roč. 20, č. 2, s. 26-32.
- [101] SALÁK, M., FRANTOVÁ, M., (2020). Návrh a výroba modelu mostu inspirovaného origami. *BETON TKS*, roč. 20, č. 2, s. 34-39.
- [102] KOPKÁNĚ, D., BODNÁROVÁ, L., HELA, R., HERKA, P., ŠTAHEL, P., (2016). Patent č. 305770: *Zařízení pro přípravu vzorků pro posouzení rozptýlení vláknité polypropylenové výztuže v cementových kompozitech a způsob přípravy vzorků na tomto zařízení*. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Applications/2013/PPVCZ2013_1073A3.pdf
- [103] KNÍŽEK, R., JIRSÁK, O., SANETRník, F., KOŠKOVÁ, M., KARHÁNKOVÁ, D., WIENER, J., (2016). Patent č. 307884: *Způsob pro výrobu textilního kompozitu zejména pro outdoorové aplikace, který obsahuje alespoň jednu vrstvu polymerních nanovláken, a tímto způsobem připravený textilní kompozit*. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Applications/2015/PPVCZ2015_0163A3.pdf.

- [104] BROUKALOVÁ, I., (2020). Ozvěny workshopu Fibre concrete. *BETON TKS*, roč. 20, č. 2, s. 4-7.
- [105] ČSN EN 12390-7. (2009). Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [106] ČSN EN 12390-5. (2009). Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 12 s.
- [107] ČSN 73 1326. (2003). Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, Z1, Praha: Český normalizační institut, 12 s.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání vlastností vybraných polymerních vláken	19
Tabulka 2: Třídy rozlití kužele	26
Tabulka 3: Klasifikace dle zhutnitelnosti betonu	26
Tabulka 4: Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanové normou ČSN P 73 2450	32
Tabulka 5: Pevnostní třídy vláknobetonu v dostředném tahu stanovené normou ČSN P 73 2450	36

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Příklad průběhu zatěžování zkušebních trámů dle ČSN P 73 2452	35
Graf 2: Celkové smrštění HPFRC s přídavkem (a) suchých PP vláken, (b) vlhčených PP vláken	44
Graf 3: Vliv obsahu PE vláken na průměrnou plochu trhlin na 1 m ²	45
Graf 4: Pevnost v příčném tahu po 60 cyklech zmrazování a rozmrazování pro různé dávky PP vláken	46
Graf 5: Vliv množství PP makrovláken na pevnost v tlaku FRSCC	47
Graf 6: Vliv množství PVA makrovláken na pevnost v tlaku betonu	48
Graf 7: Vliv tahového napětí na PE a PVA vlákna	50
Graf 8: Porovnání pracovního diagramu PVA vláken s povrchovou úpravou a bez ní	50
Graf 9: Vliv PE vláken na pružné chování lehkého a normálního betonu	52
Graf 12: Pracovní diagram zvolených kontinuálních mikro a makro vláken. MF – svazek mikrovláken, MAC - monofilamentní PP makrovlákno průměru 0,82 mm	59
Graf 13: Efekt rychlosti deformace na vztah deformace a napětí	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: a) Fibrilovaná vlákna b) Monofilamentní	11
Obr. 3: Schéma tavného zvlákňování	12
Obr. 4: Mokré zvlákňování	13
Obr. 5: Zvlákňování za sucha	14
Obr. 6: Elektrostatické zvlákňování	15
Obr. 7: Tlaková nádoba pro zjištění obsahu vzduchu	28

Obr. 8: Místa měření UZ impulzové metody na kostce hrany 150 mm	29
Obr. 9: Umístění snímačů pro měření podélného, příčného a kroutivého kmitání	30
Obr. 10: Umístění zkušebního tělesa a měřících zařízení	33
Obr. 11: zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli o délce hrany 150 mm	34
Obr. 12: Zařízení pro zkoušky pevnosti za ohybu dle ČSN P 2452.....	34
Obr. 13: Ukázka průběhu a měření vzdálenosti makrotrhliny od osy vzorku.....	35
Obr. 14: Osazení zkušebního tělesa s průhyboměrem.....	37
Obr. 15: Formy s betonářskou výztuží připravené na zalití vláknobetonem.....	38
Obr. 16: Ostění tunelu z prefabrikovaných dílců s PP vlákny.....	38
Obr. 17: Plovoucí ostrůvek na rybníku u Tovačova.....	39
Obr. 18: Ponorné molo 1) s nafouknutým vakem, 2) vyfouknutým vakem.....	39
Obr. 19: Betonáž mostního římsového prefabrikátu s PP vlákny.....	40
Obr. 20: Osazení prefabrikovaného dílce opěrné stěny z vláknobetonu	40
Obr. 21: Hotový model vyztužený PVA vlákny MasterFiber 401 12 mm.....	41
Obr. 22: Spletená PP makrovlákna.....	51
Obr. 23: Proces samohojení založený na přítomnosti a) bakterií b) vláken.....	56
Obr. 24: Procentuální zastoupení krystalů daných velikostí	56
Obr. 25: Schéma samohojení betonu s a) PP vlákna a bakteriemi b) PVA vlákny a bakteriemi	57
Obr. 26: Schéma ukládání kontinuálních vláken na matrici.....	58
Obr. 27: SHPB testovací zařízení a) schéma b) skutečné zařízení.....	60
Obr. 28: Porušení vzorků s různým množstvím PP vláken při zvyšující se rychlosti deformace	62
Obr. 29: Schéma zkušebního zařízení dle patentu 305770 a vzorků po zkoušení s b) homogenním rozdělením vláken, c) s vlákny ve shlucích.....	67
Obr. 30: Povrch a binární obraz trhlin po různých časech hojení na a) referenčním vzorku b) betonu s PP vlákny a bakteriemi	70
Obr. 31: Schéma návrhu zkoušení vláknobetonu	71

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

LCP (*Liquid Crystal Polymer*) – Polymer z tekutých krystalů

PE (*Polyethylene*) - Polyethylen

PES (*Polyester*) - Polyester

PA (*Polyamid*) - Polyamid

PVA (*Polyvinylalcohol*) – Polyvinyl alkohol

PP (*Polypropylene*) - Polypropylen

FRC (*Fiber Reinforced Concrete*) - Vláknobeton

SIFCON (*Slurry Infiltrated Fibre Concrete*) – Vláknobeton s vysokým obsahem vláken

FRSCC (*Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete*) – Samozhutnitelný vláknobeton

UZ – Ultrazvuk

HPFRC (*High Performance Fiber Reinforced Concrete*) - Vysokohodnotný vláknobeton

HDPE (*High Density Polyethylene*) – Vysokohustotní polyethylen

SCC (*Self-Compacting Concrete*) – Samozhutnitelný beton

HPC (*High Performance Concrete*) – Vysokohodnotný beton

ST (*Steel*) – Ocelová (vlákna)

ECC (*Engineered Cementitious Composite*) – Kompozit vyztužený polymerovými vlákny

SHCC (*Strain-Hardening Cementitious Composite*) - Cementové kompozity odolné vůči deformaci

FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) – Polymer vyztužený vlákny

SHPB (*Split Hopkinson Pressure Bar*) - Hopkinsonova rozdělená tlaková tyč

HPFRHWSCC (*High Performance Fiber Reinforced Heavy Weight Self-Compacting Concrete*) - Vysokohodnotný samozhutnitelný těžký vláknobeton

NWA (*Normal Weight Agregate*) – Kamenivo normální objemové hmotnosti

HWA (*Heavy Weight Agregate*) - Těžké kamenivo